

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**Wilian Carlos de Oliveira**

**REDUÇÃO DO “EMPUXO MAGNÉTICO DESBALANCEADO”  
EM GERADORES SÍNCRONOS**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção  
do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

**Orientador: Renato Carlson, Dr. Eng.**

Florianópolis, Julho de 2008

# REDUÇÃO DO “EMPUXO MAGNÉTICO DESBALANCEADO” EM GERADORES SÍNCRONOS

Wilian Carlos de Oliveira

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

---

Prof. Renato Carlson, Dr. Eng.

Orientador

---

Professora Kátia Campos de Almeida, PhD

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

---

Prof. Renato Carlson, Dr.  
Presidente

---

Prof. João Pedro Assumpção Bastos, Dr. Etat.  
Co-orientador

---

Prof. Nelson Sadowski, Dr.

---

Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.

---

Jorge Johnny Rocha Echeverria, Dr.

*À minha esposa Michele,  
pelo apoio aos estudos,  
compreensão em minha ausência  
e cuidados com nossa pequena Melissa*

# AGRADECIMENTOS

Especialmente aos meus pais, Inocêncio e Glória, pelo apoio e incentivo aos estudos desde muito cedo, por acreditar em nossa independência e condição de crescer.

A Mauro Ken Iti Uemori, por apoiar nosso trabalho e continuidade de conclusão do mestrado, tornando simples o entendimento de geradores síncronos.

Ao companheiro de trabalho Cláudio Pamplona dos Santos Dias, pela ajuda e paciência em explicar as temidas séries de Fourier.

A Jorge Johnny Rocha Echeverria, por tornar acessíveis seus estudos e formulações.

Às empresas Weg e Alstom, por incentivar a formação técnica de seus colaboradores.

A Companhia Energética de São Paulo – Cesp, por apoiar este estudo como parte de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento.

Aos professores Renato Carlson e Nelson Sadowski, por acreditarem na conclusão desta dissertação, mesmo com a mudança de empresa e de tema, em tão pouco tempo.

A Deus, pela onipresença, sempre comigo em todas as etapas e dificuldades da vida.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho pudesse ser concretizado.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>x</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	3
1.3 COROLÁRIO.....	5
<b>2 ENROLAMENTOS TRIFÁSICOS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS .....</b>	<b>7</b>
2.1 TENSÃO INDUZIDA E REAÇÃO DA ARMADURA.....	10
2.1.1 Tensão Induzida.....	10
2.1.2 Força Magnetomotriz de Reação de Armadura .....	13
2.2 FASORES DE TENSÃO E CONEXÕES EQUIPOTENCIAIS .....	18
2.3 O ENROLAMENTO DA UG#11 DE ILHA SOLTEIRA.....	19
<b>3 EXCENTRICIDADE E SEUS EFEITOS .....</b>	<b>29</b>
3.1 VARIAÇÃO DE PARÂMETROS DEVIDO A EXCENTRICIDADE .....	29
3.2 O EFEITO DA SATURAÇÃO .....	31
<b>4 CORRENTES DE CIRCULAÇÃO .....</b>	<b>34</b>
4.1 ENROLAMENTO ESTATÓRICO ORIGINAL .....	34
4.2 ENROLAMENTO ESTATÓRICO COM CONEXÕES EQUIPOTENCIAIS .....	38
<b>5 CAMPOS MAGNÉTICOS NO ENTREFERRO.....</b>	<b>43</b>
5.1 CAMPO MAGNÉTICO DOS PÓLOS .....	43
5.2 CAMPO MAGNÉTICO DE REAÇÃO DE ARMADURA.....	46
5.2.1 Enrolamento Estatórico Original.....	49
5.2.2 Enrolamento Estatórico com Conexões Equipotenciais.....	51
<b>6 “EMPUXO MAGNÉTICO” DESBALANCEADO .....</b>	<b>55</b>
<b>7 ESTUDO DE CASOS.....</b>	<b>61</b>

7.1 UMP - SEM REAÇÃO DA ARMADURA.....	61
7.2 UMP - ENROLAMENTO ONDULADO MODIFICADO .....	64
7.3 UMP - ENROLAMENTO IMBRICADO .....	66
<b>8 CONCLUSÕES .....</b>	<b>69</b>
<b>9 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>73</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>78</b>

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Empuxo Magnético por Pólo e Força Magnética Resultante Devido o Deslocamento do Rotor.....	2
Figura 2.1 – Distribuição da Densidade de Fluxo Magnético no Entreferro devido aos Pólos.....	8
Figura 2.2 – Fasores de Tensão $E_1, E_2, \dots$ , e ângulo elétrico $\alpha_e$ de Enrolamentos Distribuídos.....	9
Figura 2.3 – Campo Magnético – Lei Circuital de Ampère.....	10
Figura 2.4 – Força magnetomotriz produzida por uma semi-espira na ranhura j - corrente positiva .....	13
Figura 2.5 – Força magnetomotriz produzida por uma semi-espira na ranhura j + Y – corrente negativa .....	16
Figura 2.6 – Força magnetomotriz de uma espira .....	17
Figura 2.7 – Força magnetomotriz de reação de armadura de enrolamentos trifásicos .....	17
Figura 2.8 – (a) Enrolamento com Bobinas em Série. (b) Enrolamento com Dois Circuitos Paralelos e com Conexões Equipotenciais nos Terminais de Fase e Neutro. (c) Conexões Equipotenciais Entre Barras.....	19
Figura 2.9 – Fragmento esquema de bobinagem UG#11 ILS – fase A vermelho .....	22
Figura 2.10 – Conexão equipotencial 1 – 30 <sup>º</sup> barras .....	26
Figura 2.11 – Conexões equipotenciais fase A.....	27
Figura 2.12 – Conexões equipotenciais fase B.....	27
Figura 2.13 – Conexões equipotenciais fase C.....	28
Figura 3.1 – Deslocamento do Centro Rotor - Excentricidade Estática .....	29
Figura 3.2 – (a) Entreferro constante – (b) Entreferro função da excentricidade.....	30
Figura 3.4 (a) Tensão induzida barras estatóricas entreferro constante – (b) Tensão função da excentricidade .....	31
Figura 3.5 – Diferentes estados de saturação do gerador em função da variação do entreferro.....	32
Figura 3.6 – Indução magnética em função do entreferro .....	32
Figura 4.1 – Três Circuitos Paralelos do Enrolamento Estatórico.....	35
Figura 4.2 – Circuito Equivalente - Correntes de Malha e de Ramo de um Circuito Paralelo de uma Fase.....	36
Figura 4.3 – Circuito Equivalente Fase A com suas Conexões Equipotenciais.....	38
Figura 4.4 – Circuito Equivalente Fase B com suas Conexões Equipotenciais.....	40
Figura 4.5 – Circuito Equivalente Fase C com suas Conexões Equipotenciais.....	41

Figura 5.1 – Densidade de Fluxo Magnético dos Pólos – Gerador em Vazio.....	44
Figura 5.2 – Gerador dividido em 6 partes iguais, intervalos a cada $2.C_p.\tau_p$ ; $D_p = 90$ , $C_p = 7$ .....	45
Figura 5.3 – (a) Entreferro Variável para cada Intervalo (b) Magnitude de Indução $B_0$ para cada Intervalo.....	45
Figura 5.4 – Distribuição da Densidade de Fluxo Magnético no Entreferro devido aos Pólos com $\varepsilon = 10\%$ .....	46
Figura 5.5 – Permeância Específica do Entreferro .....	47
Figura 5.6 – Densidade de Fluxo Magnético de Reação da Armadura – gerador em carga .....	48
Figura 5.7 – Distribuição de Densidades de Fluxos Magnéticos – Excitação do Campo Bf1, Reação da Armadura B1A ( $I_{nom.}$ ) e Resultante B1R – gerador em carga.....	48
Figura 5.8 – Indução dos Pólos e Reação da Armadura (x 20) – intervalo 1, circulação com sinal positivo.....	50
Figura 5.9 – Indução dos Pólos e Reação da Armadura (x 20) – intervalo 3 - circulação com sinal negativo .....	51
Figura 5.10 – Reação Armadura antes (B1A) e depois (Bd1A) das Conexões Equipotenciais – intervalo 1.....	52
Figura 5.11 – Resultante antes (B1R) e depois (Bd1R) das Conexões Equipotenciais – intervalo 1.....	52
Figura 5.12 – Reação Armadura antes (B3A) e depois (Bd3A) das conexões equipotenciais – intervalo 3.....	53
Figura 5.13 – Resultante antes (B3R) e depois (Bd3R) das Conexões Equipotenciais – intervalo 3.....	53
Figura 6.1 – Força Magnética nos Pólos do Intervalo 1.....	56
Figura 6.2 – Força Magnética nos Pólos do Intervalo 3.....	56
Figura 6.3 – Forças em cada Intervalo e UMP Resultante – enrolamento original.....	57
Figura 6.4 – Força antes (F) e depois (Fd1) das equipotenciais – intervalo 1 – diminuição das forças.....	58
Figura 6.5 – Forças antes (F3) e depois (Fd3) das equipotenciais – intervalo 3 – aumento das forças.....	58
Figura 6.6 – Forças em cada Intervalo e UMP Resultante – Enrolamento com Conexões Equipotenciais.....	59
Figura 7.1 – Forças Magnéticas para os Pólos do Intervalo 1 – sem correntes de circulação .....	62
Figura 7.2 – Forças Magnéticas para os Pólos do Intervalo 3 – sem correntes de circulação .....	62
Figura 7.3 – Tensões Induzidas nos Circuitos Paralelos da Fase A – enrolamento ondulado original .....	63



Figura 7.4 – Tensões Induzidas nos Circuitos Paralelos da Fase A – enrolamento ondulado modificado .....	64
Figura 7.5 – Forças Magnéticas para os Pólos do Intervalo 1 – Enrolamento Ondulado Modificado.....	65
Figura 7.6 – Forças Magnéticas para os Pólos do Intervalo 3 – Enrolamento Ondulado Modificado.....	65
Figura 7.7 – Tensões Induzidas nos Circuitos Paralelos da Fase A – enrolamento imbricado.....	66
Figura 7.8 – Forças Magnéticas para os Pólos do Intervalo 1 – Enrolamento Imbricado.....	67
Figura 7.9 – Forças Magnéticas para os Pólos do Intervalo 3 – Enrolamento Imbricado.....	68
Figura A.1 – Carta de Campo do Condutor 1 Circulando Corrente .....	74
Figura A.2 – Indução Magnética no Entreferro devido Corrente no Condutor 1 .....	75
Figura A.3 – Carta de Campo do Condutor 2 Circulando Corrente .....	75
Figura A.4 – Indução Magnética no Entreferro devido Corrente no Condutor 2 .....	76
Figura A.5 – Carta de Campo do Condutor 1 e 2 Circulando Corrente .....	76
Figura A.6 – Indução Magnética no Entreferro devido Corrente em uma Espira.....	77

# LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Fasores de tensão fase A, circuito paralelo 1 .....	21
Tabela 2.2 – Fasores de tensão fase A, circuito paralelo 2 .....	23
Tabela 2.3 – Fasores de tensão fase A, circuito paralelo 3 .....	25
Tabela 4.1 – Parâmetros do Circuito Equivalente - Enrolamento Original.....	37
Tabela 4.2 – Parâmetros do Circuito Equivalente – Enrolamento com Conexões Equipotenciais – Fase A.....	39
Tabela 4.3 – Parâmetros do Circuito Equivalente – Enrolamento com Conexões Equipotenciais – Fase B.....	40
Tabela 4.4 – Parâmetros do Circuito Equivalente – Enrolamento com Conexões Equipotenciais – Fase C.....	42
Tabela 6.1 – Força Magnética por Intervalo e UMP Resultante.....	60

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

# **REDUÇÃO DO “EMPUXO MAGNÉTICO DESBALANCEADO” EM GERADORES SÍNCRONOS**

**Wilian Carlos de Oliveira**

Julho/2008

Orientador: Renato Carlson, Dr.

Área de Concentração: Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos.

Palavras-chave: força magnética, força magnetomotriz, reação de armadura, indução magnética, empuxo magnético, equipotenciais, circuitos paralelos.

A força magnética de atração entre estator e rotor presente em máquinas síncronas é um tópico bastante debatido na comunidade de profissionais que lidam com estes equipamentos.

O desequilíbrio destas forças de origem magnética leva a um desbalanceamento do rotor, principalmente vinculado à não uniformidade do entreferro, comumente caracterizada por uma excentricidade do rotor em relação ao estator. Este fenômeno é conhecido com “Empuxo Magnético” Desbalanceado (UMP – Unbalanced Magnetic Pull).

Todavia, o estudo de um procedimento para mitigar esse efeito, com a inclusão de conexões equipotenciais, tem sido pouco explorado.

A adição de tais conexões conduz a um aumento das correntes de circulação entre os circuitos paralelos do enrolamento estatórico, alterando desta maneira a força magnetomotriz de reação da armadura (FMRA).

O produto da FMRA com a permeância específica do entreferro leva a uma distribuição de densidade de fluxo magnético de reação da armadura, que conjugada com a distribuição de densidade de fluxo magnético de excitação produzida pelos pólos, define a indução magnética resultante no entreferro.

Sendo as forças magnéticas de atração diretamente proporcionais ao quadrado da indução magnética resultante no entreferro, a alteração em seus valores ao longo da circunferência do rotor, com o auxílio das conexões equipotenciais, conduz a uma mitigação do empuxo magnético desbalanceado.

Além de discorrer sobre os fenômenos presentes no cálculo das forças de atração, apresenta-se também como a distribuição dos enrolamentos estatóricos e de seus caminhos paralelos influem na FMRA, na indução magnética resultante e conseqüentemente no UMP.

A metodologia desenvolvida foi aplicada a um caso real e seus resultados teóricos são apresentados. Sua implementação prática esta sendo executada como parte de um projeto de pesquisa e desenvolvimento conjunto da Companhia Energética de São Paulo com a Alstom Hydro Energia Brasil Ltda.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements of the degree of Master in Electrical Engineering.

## **REDUCTION OF UNBALANCED MAGNETIC PULL IN SYNCHRONOUS GENERATORS**

**Wilian Carlos de Oliveira**

July/2008

Adivisor: Renato Carlson, Dr.

Area of Concentration: Electromagnetism and Electromagnetic Devices.

Keyword: magnetic force, magneto motive force, armature reaction, magnetic field, magnetic pull, equipotential, parallel circuits.

The attractive magnetic force between stator and rotor present in synchronous machines is a topic currently discussed in the community of professionals working on these equipments.

A lack of balance of these magnetic forces origin leads to a rotor unbalance, characterized by an eccentricity of rotor in relation to the stator. This phenomenon is known as Unbalanced Magnetic Pull – UMP.

However, the development of a procedure to mitigate this effect, with the inclusion of equipotential connections, has been rarely explored.

The addition of such connections leads to an increment of the circulating currents through parallel circuits on the stator winding, thus changing the magneto-motive force of armature reaction (FMRA).

The product of FMRA with the specific permeance of air gap give the magnetic flux density distribution of armature reaction. When combined with the magnetic flux density distribution of excitation generated in the poles, it defines the resulting magnetic induction in the air gap.

As the forces of magnetic attraction are directly proportional to the square of the resulting magnetic induction in the air gap, a change in their values along the circumference of the rotor, with the help of equipotential connections, may mitigate the unbalanced magnetic pull.

After presenting the phenomenon and the calculation process of the attractive magnetic forces, it is also shown how the distribution of the stator winding and its parallel circuits influences the FMRA, the resulting magnetic induction and the UMP.

The methodology developed was applied to a real case and its theoretical results are presented. Its implementation is being executed as part of research and development project of the Companhia Energética de São Paulo in collaboration Alstom Hydro Energia Brasil Ltda.

# 1 INTRODUÇÃO

O Empuxo Magnético Desbalanceado ou do inglês UMP - Unbalanced Magnetic Pull - têm sido objeto de preocupação desde o alvorecer do projeto de máquinas elétricas girantes, como demonstrado no trabalho de Rosemberg [1], já em 1918.

O termo “empuxo magnético” é utilizado largamente pelos fabricantes de máquinas elétricas. Todavia a definição de empuxo é dada pelo Princípio de Arquimedes, que estabelece: “Todo corpo imerso, total ou parcialmente, num fluido em equilíbrio, dentro de um campo gravitacional, fica sob a ação de uma força vertical, com sentido ascendente, aplicada pelo fluido. Esta força é denominada empuxo ( ), cuja intensidade é igual ao peso do líquido deslocado pelo corpo.”

Neste trabalho o uso e costume do termo empuxo magnético será mantido, sendo seu significado aplicado a resultante de forças magnéticas.

Este fenômeno, que se caracteriza por um desbalanceamento de forças magnéticas no entreferro, restringe a operação de hidrogeradores provocando:

- altos níveis de oscilação no eixo,
- indução de freqüências de vibração que podem entrar em ressonância com a vibração mecânica,
- ruídos,
- redução da rotação crítica,
- flexões do eixo que podem, em casos mais extremos, levar ao atrito entre estator e rotor.

O desbalanceamento das forças magnéticas ocorre por conta de uma não uniformidade do entreferro, que na maioria das vezes é de origem mecânica. Assim, mesmo com a máquina fria, o estator e rotor sendo perfeitamente cilíndricos e concêntricos, com a máquina em regime, portanto quente, poderão ocorrer variações

consideráveis no comprimento do entreferro devido à diferença de temperaturas entre o núcleo do estator e sua estrutura mecânica de suporte. Também pode ser considerado um possível desvio de montagem entre a superfície interna do estator e a superfície externa do rotor, além das folgas entre o eixo e os seus mancais durante a vida útil da máquina.

Como apresentado na figura 1.1, sobre o campo magnético gerado no entreferro das máquinas elétricas girantes, define-se uma força de atração magnética entre estator e rotor. Essas forças radiais agindo na superfície do rotor são elevadas, todavia são canceladas em máquinas onde o rotor é concêntrico com o estator.

O deslocamento do centro do rotor em relação ao centro de estator é definido como excentricidade estática relativa  $\epsilon$  e pode ser calculada com auxílio da NBR 13224 [2]. Desta forma, estando o rotor excêntrico, as componentes das forças não serão mais anuladas e na região de menor entreferro, por conta da maior densidade de fluxo, haverá uma força maior que na região de maior entreferro, com menor densidade de fluxo. Estas forças desequilibradas levam ao Empuxo Magnético Desbalanceado.

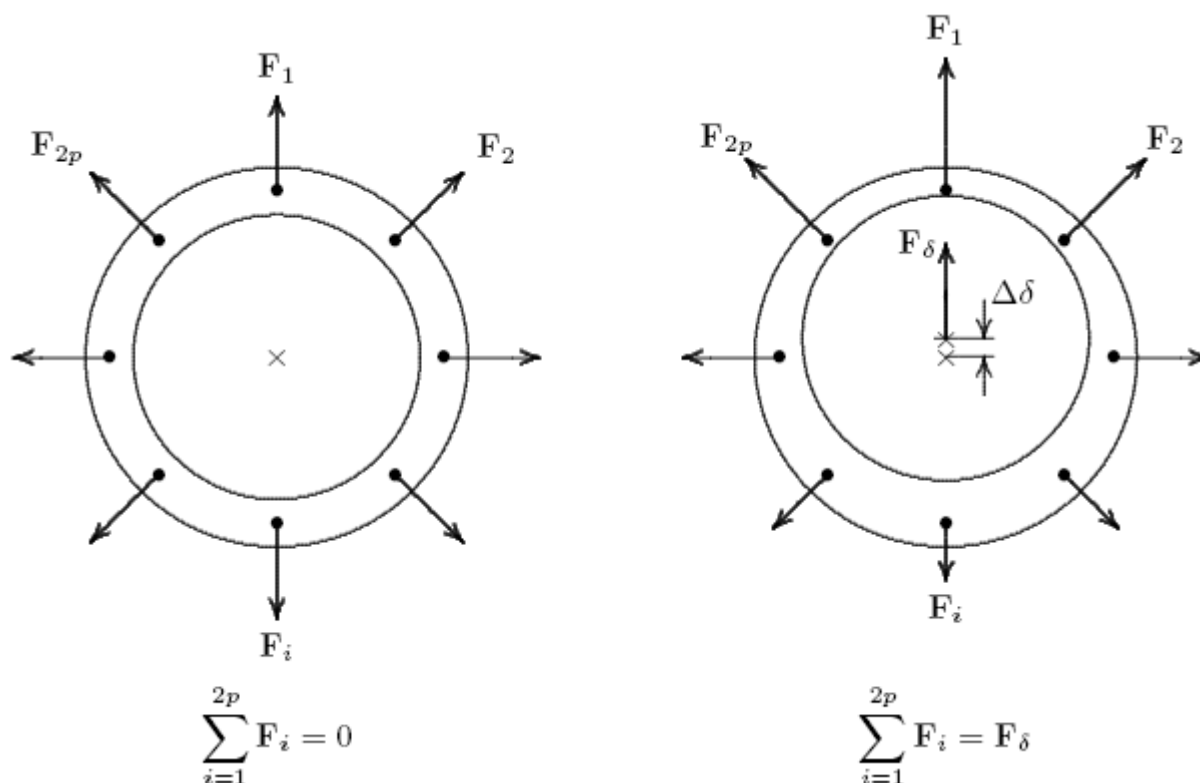


Figura 1.1 – Empuxo Magnético por Pólo e Força Magnética Resultante Devido o Deslocamento do Rotor

## 1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O problema do Empuxo Magnético Desbalanceado vem sido estudado a longo tempo, todavia a bibliografia encontrada mostra maior interesse em mitigar o efeito do UMP em motores de indução, que possuem pequeno entreferro, onde este fenômeno se mostra mais presente. Citações aplicadas a máquinas síncronas são também encontradas, porém em menor número.

Rosemberg [1], em 1918, aborda a redução do UMP com a adição de conexões equipotenciais para impor o mesmo potencial em bobinas diametralmente opostas. Robinson [3], em 1943, ilustra o efeito das ligações em série e paralelo no resultado do empuxo magnético.

Berman & Erlick [4] apresentam o enrolamento de um motor de indução ao qual adiciona em seus caminhos paralelos conexões equipotenciais. Mostram neste trabalho a influência da excentricidade no entreferro, calculando as correntes de magnetização, a força magnetomotriz e a indução no entreferro com o auxílio da função de permeância do motor. O empuxo é calculado para uma excentricidade estática, em que verifica através de ensaios significativa redução do UMP, quando comparado com os valores sem as conexões equipotenciais. Em 1993, em [5] complementa o trabalho anterior verificando o efeito da excentricidade dinâmica.

Em 1993, Bortoli, Salon, Burow & Slarik [6] mostram a redução do UMP e de algumas harmônicas de força magnética que causam vibração analisando a densidade do fluxo por elementos finitos.

Burakov & Arkkio [7], em 2006 e 2007, estudam um motor de indução de gaiola em diferentes frequências e verificam que a influência dos enrolamentos paralelos do estator reduz o UMP, mostrando que as componentes de força associadas com campos magnéticos devido a excentricidade é afetada por estes caminhos paralelos, especialmente nas frequências próximas da frequência de rotação mecânica da máquina.

## 1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação foi estruturada em nove capítulos, procurando facilitar a compreensão com uma divisão clara dos assuntos abordados.

O capítulo 2 discorre sucintamente sobre enrolamentos trifásicos de máquinas síncronas, definindo alguns parâmetros e características. Aborda o tema da geração de tensão nestes enrolamentos através de fasores de tensão, apresentando para o enrolamento estatórico da Unidade Geradora 11 da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira (UG#11 da UHE de ILS), do tipo ondulado, as possíveis conexões entre as barras estatóricas. Apresenta também uma abordagem para o cálculo da força magnetomotriz de reação de armadura (FMRA) para a obtenção da indução magnética da reação da armadura.

O capítulo 3 introduz o conceito da excentricidade e seu efeito na variação do entreferro, da indução magnética do pólo e da tensão induzida no enrolamento do estator.

O capítulo 4 apresenta o surgimento das correntes de circulação em função da diferença de potencial de cada circuito paralelo. A primeira parte aborda as correntes que surgem no enrolamento original, ou seja, como ele está disposto atualmente; a segunda parte mostra o surgimento de novas correntes de circulação em função da inserção das conexões equipotenciais.

Os campos magnéticos presentes no entreferro estão apresentados no capítulo 5. Encontra-se também neste capítulo a definição da onda de permeância para a máquina síncrona de pólo saliente com raio único, desenvolvido por Rocha [8].

O Empuxo Magnético Desbalanceado é calculado no capítulo 6 para as condições do enrolamento original e com as novas conexões.

Para a validação do método o capítulo 7 apresenta estudo de casos com outras disposições do enrolamento. Nesse é calculado o UMP sem o efeito das correntes de circulação, com o enrolamento tipo imbricado e outra disposição para o enrolamento do tipo ondulado.

No capítulo 8 são estabelecidas as conclusões da dissertação; no capítulo 9 as recomendações para trabalhos futuros.



## 1.3 COROLÁRIO

Esta dissertação de mestrado busca verificar a efetiva mitigação do UMP quando se adicionam ao enrolamento estatórico novas conexões, implicando no surgimento de caminhos paralelos para a circulação de corrente. O trabalho é parte do estudo de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) entre a Companhia Energética de São Paulo (CESP) e a ALSTOM Power Systems Hydro para um problema de oscilação do rotor da UG#11 da UHE de ILS, que vem provocando limitações de desempenho em determinadas faixas de operação.

O desbalanceamento magnético de forças nesse gerador atinge até 600  $\mu\text{m}$  de oscilação no mancal guia do gerador, conforme ensaios realizados em janeiro de 2008.

A topologia do gerador é W-8, ou seja, há apenas um mancal guia abaixo do gerador, sendo o mancal de escora alocado na turbina, ou guarda-chuva, como é comumente conhecido. Como não há outro mancal de guia acima do gerador neste arranjo de mancais, poderá haver maior oscilação do rotor do gerador em casos de máquinas com entreferros não uniformes.

O intuito do trabalho é reduzir os níveis de oscilação do gerador para valores aceitáveis sem grandes interferências mecânicas, permitindo assim sua operação em maiores faixas.

Para o problema da UG#11 citada a solução clássica seria corrigir a excentricidade do gerador usinando e calçando os pólos na periferia do rotor, buscando um entreferro mais constante. Todavia esta solução, pelo tempo de parada para sua confecção se torna economicamente onerosa.

Na UHE de ILS há outros geradores com valores de oscilação ligeiramente acima dos valores permitidos, entretanto é na UG#11 que os níveis de oscilação para baixas cargas conduzem a sua limitação de operação.

A limitação em baixa carga ou a vazio ocorre porque há pouca corrente circulando no enrolamento do estator e o efeito da reação da armadura é reduzido. Desta forma a parcela do campo de excitação dos pólos age com grande influência no campo magnético resultante no entreferro.

A correção e equilíbrio eletromagnético das forças de atração entre estator e rotor utilizando conexões equipotenciais para criar “novos caminhos paralelos” e

aumentar a circulação de corrente se torna vantajosa economicamente e do ponto de vista de parada da máquina.

Outros casos serão descritos para ilustrar como as correntes que circulam em máquinas excêntricas e os tipos de enrolamento atuam para definir o Empuxo Magnético Desbalanceado de uma máquina elétrica.

## 2 ENROLAMENTOS TRIFÁSICOS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

As máquinas síncronas possuem seu princípio de funcionamento baseado nas leis de indução e conjugado eletromagnético. Nestas máquinas o enrolamento de campo no rotor é percorrido por corrente contínua com intuito de gerar um campo magnético no entreferro. Este campo estando variando no tempo e espaço em função da rotação do rotor induz uma tensão nos enrolamentos alocados nas ranhuras do estator, conforme definido pela Lei de Faraday-Lenz.

$$e = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

Onde,

$N$  - número de espiras de uma fase

$\frac{d\phi}{dt}$  - variação temporal do fluxo magnético

Nos geradores trifásicos as três fases estão defasadas de 120° elétricos e para que as tensões sejam balanceadas e simétricas o número de espiras do enrolamento de cada fase deve ser igual. Utilizam-se várias espiras para formar o enrolamento estatórico, sendo o conjunto de  $N$  espiras em série denominado bobina.

Como ilustrado na figura 2.1 a distribuição de fluxo gerado pelos pólos no entreferro é alternada, mas não senoidal, contendo harmônicas que são prejudiciais ao funcionamento da máquina podendo causar ruídos, vibrações, perdas excessivas e aquecimento.

A outra parcela que compõe a distribuição de densidade de fluxo magnético resultante no entreferro é a da reação da armadura, tendo um conteúdo harmônico não

desejado. Uma das medidas para minimizar o conteúdo harmônico e levar a uma forma de onda mais senoidal possível é o uso de enrolamentos distribuídos.

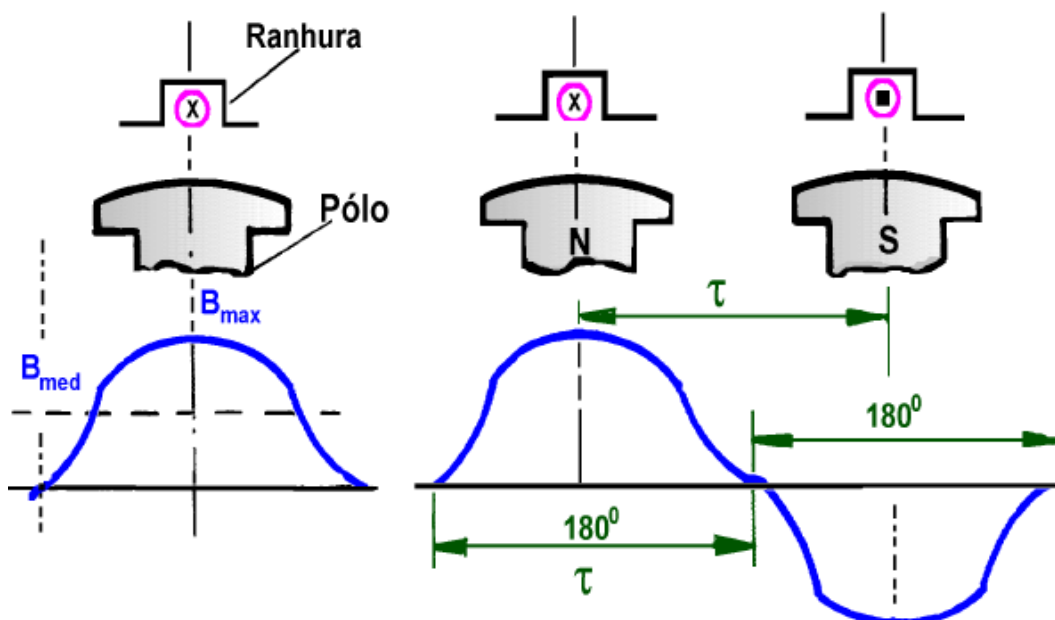


Figura 2.1 – Distribuição da Densidade de Fluxo Magnético no Entreferro devido aos Pólos

A distribuição das espiras em várias bobinas leva a geração de pequenos fasores de tensão  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_n$ , defasados de um ângulo elétrico  $\alpha_e$ , como observado na figura 2.2. Sendo o enrolamento distribuído em “ $q$ ” ranhuras por pólo e por fase e o passo polar  $\tau$  tendo  $180^\circ$  elétricos, o ângulo entre ranhuras é definido como segue.

$$q = \frac{Z}{m \cdot 2p} \quad (2)$$

$$\alpha_e = \frac{180^\circ}{m \cdot q} = \frac{60^\circ}{q} \quad (3)$$

Onde,

$q$  – número de ranhuras por pólo e por fase

$Z$  – número de ranhuras

$m$  – número de fases, trifásico  $m = 3$

$2p$  – número de pólos

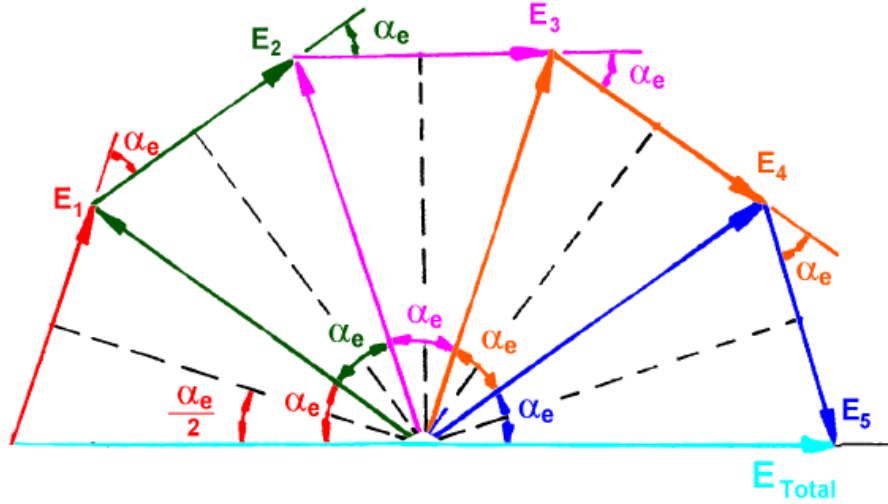


Figura 2.2 – Fasores de Tensão  $E_1, E_2, \dots$ , e ângulo elétrico  $\alpha_e$  de Enrolamentos Distribuídos

As bobinas podem ser conectadas de várias maneiras em um enrolamento, podendo ser em série ou em paralelo, sendo o número de caminhos paralelos  $a$  dependente do número de pólos, número de ranhuras e limites de correntes por ramo.

Na maioria dos esquemas de enrolamento a distribuição dos grupos de bobinas repete-se na circunferência do estator. Esta repetição está associada ao  $q$  da máquina, podendo ser verificada através de dois fatores, definidos como  $D_p$  e  $C_p$ , resultado da fração irredutível da equação (6).

$$q = \frac{Z}{m \cdot 2p} = a + \frac{b}{c} = \frac{a \cdot c + b}{c} = \frac{d}{c} \quad (5)$$

$$2 \cdot m \cdot q = 2 \cdot m \cdot \frac{d}{c} = \frac{D_p}{C_p} \quad (6)$$

O fator  $D_p$  representa o número de ranhuras em uma repetição e o fator  $C_p$  o número de pares de pólos. Veremos mais adiante que a força magneto motriz possui sua harmônica fundamental associada a estes fatores.

Grupos de bobinas são bobinas associadas em série e alocadas em ranhuras adjacentes. Estes grupos podem ser ligados em série a outros grupos ou em paralelo. A distância ou distribuição dos grupos e o número de bobinas destes depende do número de ranhuras por pólo e por fase. A conexão em série ou paralelo varia de projeto a projeto e está relacionada de maneira clássica com a corrente admissível por paralelo e com a saturação da máquina.

## 2.1 TENSÃO INDUZIDA E REAÇÃO DA ARMADURA

### 2.1.1 Tensão Induzida

As tensões induzidas nos enrolamentos do estator de geradores síncronos com corrente alternada surgem da variação do fluxo magnético produzido pelos pólos do rotor, como descrito na equação (1).

Desta forma, quando há corrente contínua circulando nos pólos girantes do rotor há o aparecimento deste fluxo magnético, que leva a definição de um campo magnético  $H$  no entreferro e de uma indução magnética  $B$ .

Supondo um par de pólos com  $N_f$  espiras cada, neles circulando uma corrente de valor  $I_f$ . Aplicando a lei circuital de Ampère, obtém-se:

$$2 \cdot N_f \cdot I_f = \oint \vec{H} \bullet d\vec{l} = H \cdot 2 \cdot \delta \quad (7)$$

onde:

$H$  – Campo magnético [A/m]

$dl$  - diferencial de comprimento [m]

$\delta$  – entreferro [m]

Nas equações apresentadas o ponto em negrito ( $\bullet$ ) aplica-se ao produto vetorial, enquanto que o ponto normal ( $\cdot$ ) aplica-se à operação de multiplicação.

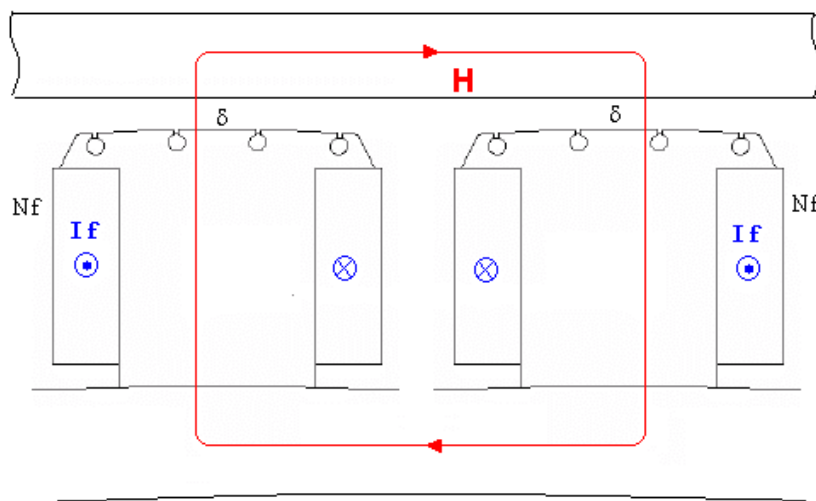


Figura 2.3 – Campo Magnético – Lei Circuital de Ampère

Sendo a permeabilidade do ferro muito superior a permeabilidade do ar ( $\mu_f \gg \mu_0$ ), pode-se considerar que todo campo magnético está presente no entreferro, desta forma:

$$H = \frac{2 \cdot N_f \cdot I_f}{2 \cdot \delta} \quad (8)$$

sendo,

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (9)$$

onde

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  [H/m] – permeabilidade magnética do ar

$B$  – indução magnética [T]

Desta forma, a indução magnética no entreferro  $B$  será:

$$B = \frac{\mu_0}{2 \cdot \delta} \cdot 2 \cdot N_f \cdot I_f \quad (10)$$

Da equação (10) obtêm-se dois elementos, a permeância específica do entreferro  $\wp$  e a força magnetomotriz  $\Im$  (FMM).

$$\wp = \frac{\mu_0}{2 \cdot \delta} \quad (11)$$

$$\Im = 2 \cdot N_f \cdot I_f \quad (12)$$

O uso da permeância específica do entreferro pode ser empregado para o cálculo das induções magnéticas em várias partes da máquina, como os gerados pelo enrolamento amortecedor e pela de reação da armadura, definindo-se assim a indução magnética  $B$  como:

$$B = \wp \cdot \Im \quad (13)$$

O interesse está na tensão gerada por cada barra, ou seja, por cada semi-espira do enrolamento estatórico. Assim, seguindo a análise apresentada por Fitzgerald [9], temos que o fluxo por pólo será:

$$\Phi_p = \left( \frac{2}{2p} \right) \cdot 2 \cdot B \cdot L_f \cdot r \quad (14)$$

onde

$r$  – raio até o entreferro [m]

$L_f$  – comprimento axial do ferro do estator / rotor [m]

Ainda segundo [9], a tensão induzida eficaz de uma fase será:

$$E_f = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot k_{enr} \cdot N_{fase} \cdot \Phi_p \quad (15)$$

onde

$f$  – frequência da rede [Hz]

$k_{enr}$  – fator de enrolamento

$N_{fase}$  – número de espiras em série por fase

Por haver interesse apenas na tensão gerada por uma semi-espira o fator de enrolamento pode ser desconsiderado na equação (15). Considerando ainda que se está interessado em geradores com barras do tipo Roebel, ou seja, barras que possuem somente uma espira, temos que  $N_{fase} = 1$ . Assim aplicando a equação (14) na equação (15) tem-se a tensão gerada por uma barra do enrolamento estatórico.

$$E_f = \frac{\sqrt{2} \cdot \pi}{p} \cdot f \cdot L_f \cdot D_\delta \cdot B \quad (16)$$

onde

$D_\delta$  – diâmetro médio do entreferro [m]

A utilização da equação (16) será explorada no próximo capítulo, quando será apresentado o conceito de excentricidade e sua relação com o entreferro, a indução magnética e a tensão induzida.



### 2.1.2 Força Magnetomotriz de Reação de Armadura

O cálculo da força magnetomotriz de reação de armadura (FMRA) será analisado levando-se em conta a FMM produzida a partir de uma semi-espira engastada em uma ranhura. Este fenômeno pode ser representado com suficiente precisão por uma onda dente de serra, conforme demonstrado por B. Hague [10] e ilustrado por Rocha [14], sendo verificado nas simulações por elementos finitos constantes no Anexo A. De modo que, para formar uma espira será necessário acomodar uma segunda semi-espira a  $\gamma$  ranhuras adiante, com o cuidado de impor corrente no sentido contrário da anterior.

As considerações são:

- entreferro uniforme;
- $\mu_{Fe} \gg \mu_0$  – permeabilidade magnética do ferro muito superior a do ar;
- entreferro  $\delta \ll$  passo polar  $\tau$ ;
- linearidade sobre a linha do entreferro

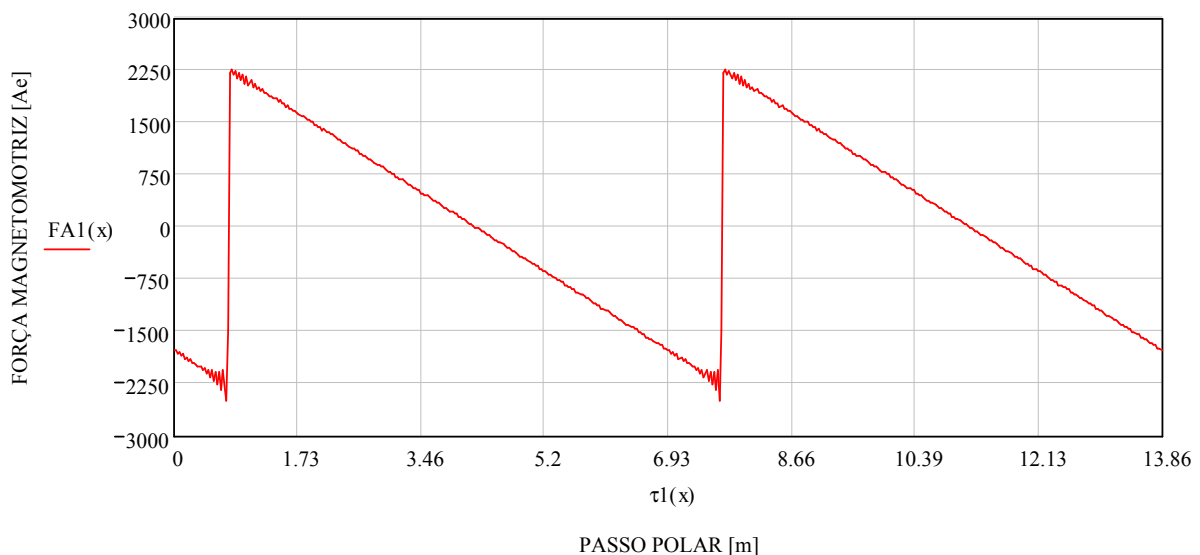


Figura 2.4 – Força magnetomotriz produzida por uma semi-espira na ranhura j - corrente positiva

A série de Fourier em sua forma trigonométrica é:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cdot \cos(k \cdot \omega \cdot x) + b_k \cdot \text{sen}(k \cdot \omega \cdot x)]$$

$$a_0 = \frac{1}{\tau} \cdot \int_{-\tau/2}^{\tau/2} f(x) \cdot dx$$

$$a_k = \frac{1}{\tau} \cdot \int_{-\tau/2}^{\tau/2} f(x) \cdot \cos(k \cdot \omega \cdot x) \cdot dx$$

$$b_k = \frac{1}{\tau} \cdot \int_{-\tau/2}^{\tau/2} f(x) \cdot \text{sen}(k \cdot \omega \cdot x) \cdot dx$$

Tomando-se a onda dente de serra da figura 2.4, esta tem uma função de simetria ímpar, em que:

$$-f(x) = f(-x) \quad (17)$$

Assim, na série de Fourier, tem-se:

$$a_0 = 0$$

$$a_k = 0$$

$$b_k = \frac{4}{\tau} \cdot \int_0^{\tau/2} f(x) \cdot \text{sen}(k \cdot \omega \cdot x) dx \quad (18)$$

$$f(x) = A \cdot x + B = \frac{-1}{C_p \cdot \tau_p} \cdot x + 1$$

O período espacial fundamental da onda de força magnetomotriz de reação de armadura está associado com o número de repetições do enrolamento, podendo ser vinculado ao número de pólos englobados nesta repetição; assim tem-se no fator  $C_p$  uma relação com a harmônica fundamental.

$$\tau = 2 \cdot C_p \cdot \tau_p \quad (19)$$

onde

$\tau_p$  - passo polar [m]

Sendo

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D_\delta}{2p} \quad (20)$$

Substituindo (20) em (19)

$$\tau = 2 \cdot Cp \cdot \frac{\pi \cdot D_\delta}{2p} = \pi \cdot D_\delta \cdot \frac{Cp}{p} \quad (21)$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{\pi \cdot D_\delta \cdot \frac{Cp}{p}} = \frac{2p}{Cp \cdot D_\delta} \quad (22)$$

Como cada barra está alocada em uma ranhura, define-se  $s_j$  como o sinal que estabelece o sentido instantâneo da corrente. Arranjando a série de Fourier, a equação da força magnetomotriz de uma semi-espira engastada em uma ranhura  $j$  é expressa por:

$$FA1(x) = \frac{2}{\pi} \cdot A_j \cdot \sum_k \frac{1}{k} \cdot \text{sen} \left( k \cdot \frac{2p}{Cp \cdot D_\delta} \cdot (x - \tau_r \cdot j) \right) \quad (23)$$

$$A_j = s_j \cdot Z \cdot I_p \quad (24)$$

onde

$A_j$  – Ampère-espira na ranhura  $j$ ;  $Z = 1$  para barras Roebel

$s_j$  – sinal instantâneo da corrente

$I_p$  – corrente de cada barra [A]

$k$  – ordens harmônicas

$x$  – posição espacial [m]

$\tau_r$  - passo de ranhura [m]

A onda dente de serra da figura 2.4 é obtida com a aplicação das equações (23) e (24), considerando-se duas barras circulando correntes no mesmo sentido. O período da onda  $\tau$  é 6,93 [m], aplicando a equação (19), já que o passo polar  $\tau_p$  é igual a 0,495 [m] e  $Cp$  igual a 7. Os dados do gerador em estudo serão apresentados e discutidos mais detalhadamente adiante.

A FMRA de uma barra alocada na ranhura  $Y$  a frente circulando corrente no sentido oposto a da anterior será:

$$FA2(x) = \frac{2}{\pi} \cdot A_{j+Y} \cdot \sum_k \frac{1}{k} \cdot \text{sen} \left( k \cdot \frac{2p}{Cp \cdot D_\delta} \cdot (x - \tau_r \cdot (j + Y)) \right) \quad (25)$$

$$A_{j+Y} = -A_j \quad (26)$$

A onda dente de serra da figura 2.5 resulta das equações (25) e (26).

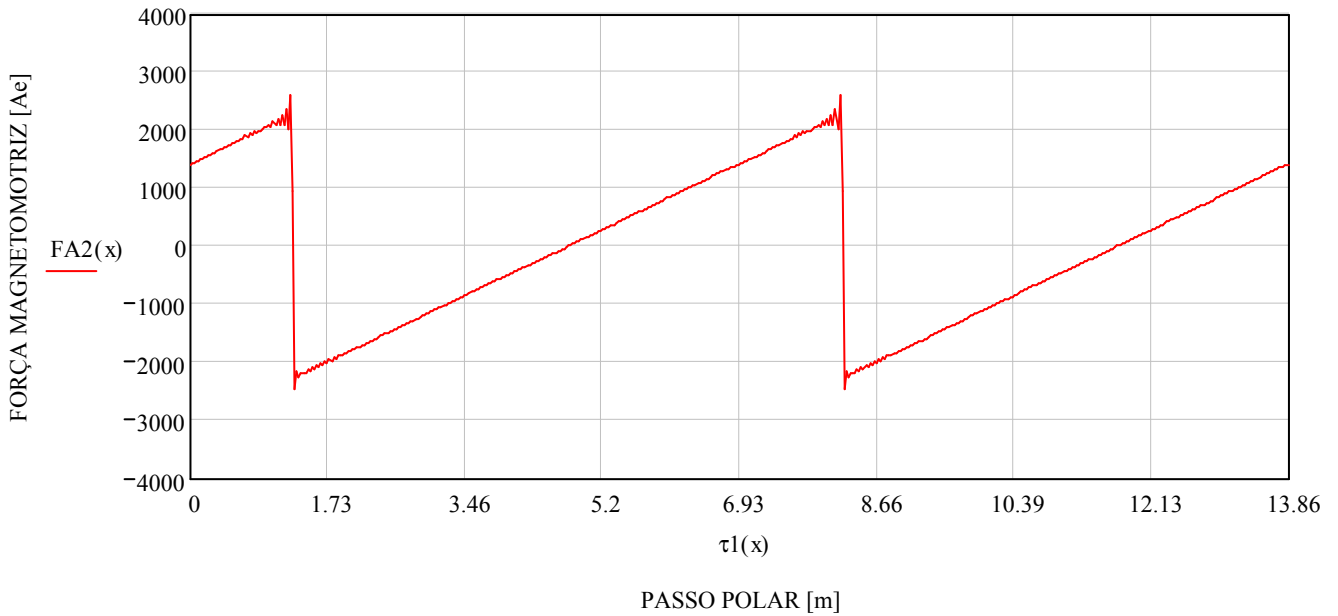


Figura 2.5 – Força magnetomotriz produzida por uma semi-espira na ranhura  $j + Y$  – corrente negativa

Para a formação FMRA de uma espira basta somar as duas ondas dente de serra das figuras 2.4 e 2.5 onde se obtém uma onda retangular.

A soma das funções FA1(x) e FA2(x) resulta na equação genérica da FMRA para uma espira em um enrolamento estático genérico.

$$FA(x) = \frac{4}{\pi} \cdot A_j \cdot \sum_k \frac{1}{k} \cdot \text{sen} \left( k \cdot \frac{p}{C_p \cdot D_\delta} \cdot \tau_r \cdot Y \right) \cdot \cos \left( k \cdot \frac{2p}{C_p \cdot D_\delta} \cdot \left( x - \tau_r \cdot \left( j + \frac{Y}{2} \right) \right) \right) \quad (27)$$

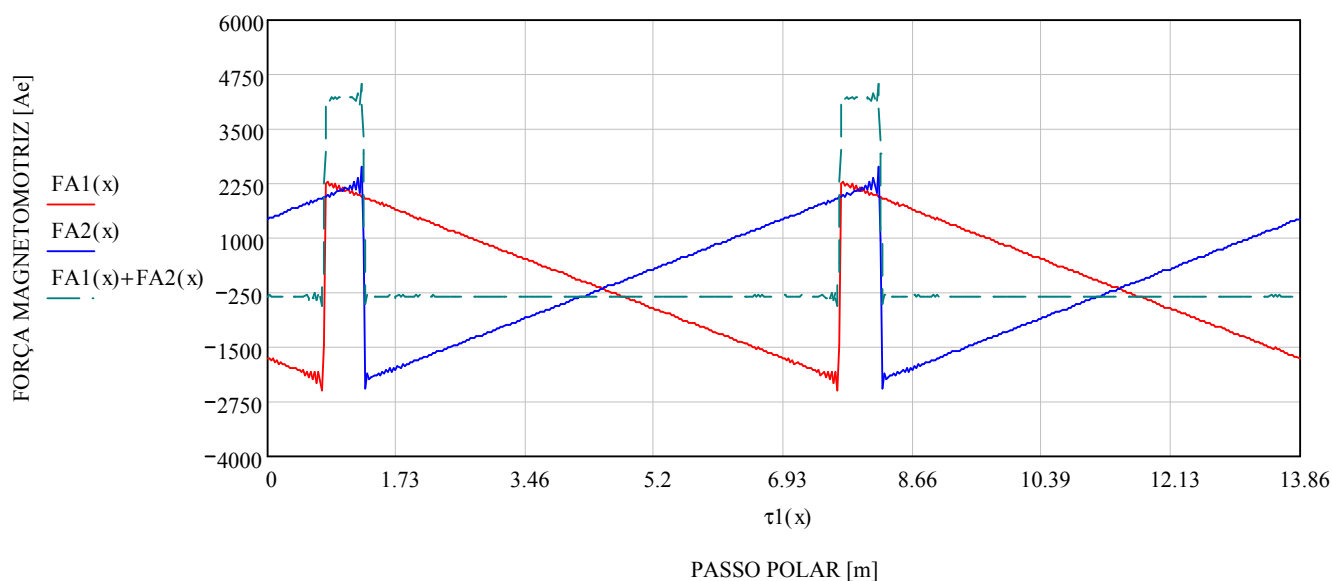


Figura 2.6 – Força magnetomotriz de uma espira

Nota-se pela figura 2.6 que cada espira do enrolamento terá uma onda retangular, representando sua FMRA a cada período fundamental. A soma dos efeitos para todas as espiras neste período forma a onda de força magnetomotriz no enrolamento estático. A figura 2.7 ilustra a FMRA de uma fase e a resultante trifásica.

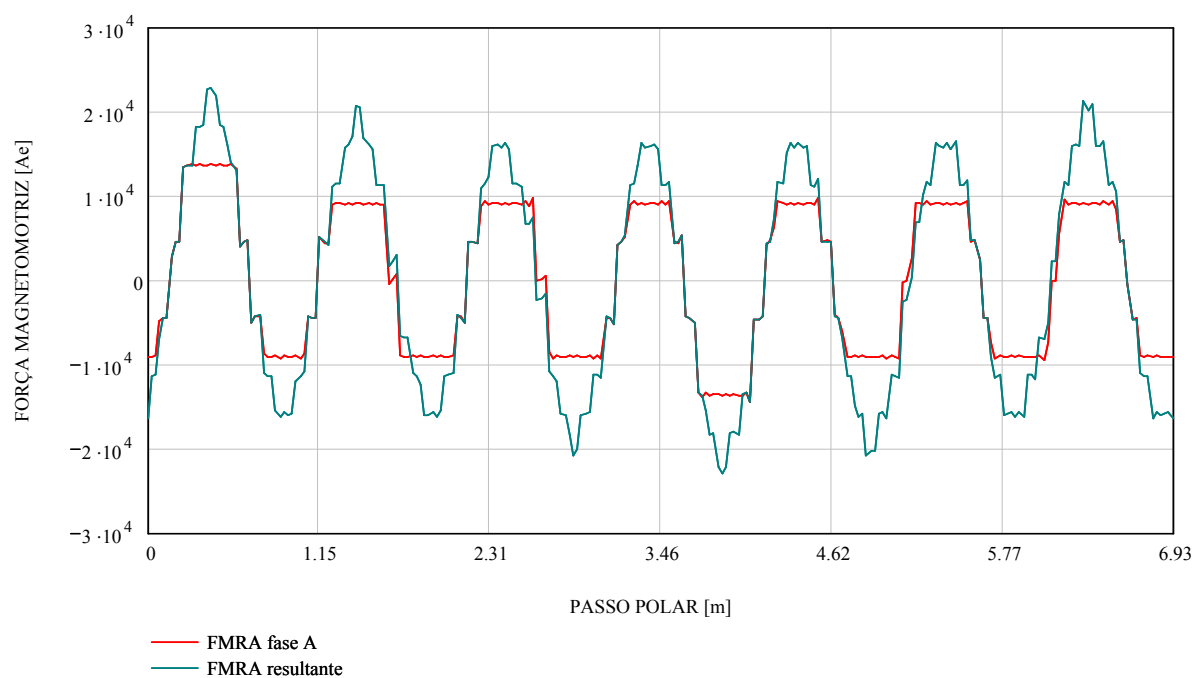


Figura 2.7 – Força magnetomotriz de reação de armadura de enrolamentos trifásicos

A equação da força magnetomotriz de reação de armadura será de grande valia para calcular o campo magnético produzido pelas correntes que circulam no enrolamento do estator, ou seja, o campo magnético de reação de armadura. Esta abordagem será detalhada no capítulo 5.

## 2.2 FASORES DE TENSÃO E CONEXÕES EQUIPOTENCIAIS

Sendo os enrolamentos na maioria dos projetos distribuídos, para a formação da tensão terminal no gerador é necessário somar cada tensão induzida por bobina ou por barra do enrolamento do estator. Se for considerada a tensão induzida por barra com o mesmo número de espiras, todos os fasores terão os mesmos módulos, diferindo apenas no ângulo  $\alpha_e$  entre eles.

A conexão de grupos de bobinas em paralelo, ou a conexão em circuitos paralelos é feita nos terminais do neutro e nos terminais da fase, ou seja, no início e fim do enrolamento, por fase, como ilustrado na figura 28 (b). Deve-se isto ao fato de que nestes terminais a soma dos fasores de tensão possui o mesmo módulo e fase, possuindo o mesmo potencial ou, como é tratado neste trabalho, possuem pontos de conexões equipotenciais.

Em máquinas com o enrolamento estatórico com circuitos paralelos sugere-se que a primeira, segunda e enésima barra de um circuito paralelo possuam o mesmo fasor de tensão da primeira, segunda e da enésima barra do outro paralelo. Entretanto como estas barras estão distribuídas na circunferência do estator em ranhuras com diferentes ângulos, o ângulo do fasor da tensão induzida por barra é também diferente, não sendo possível a conexão equipotencial de barra por barra, estando estes pontos de possível conexão limitados ou mesmo inexistentes, salvo nas conexões terminais.

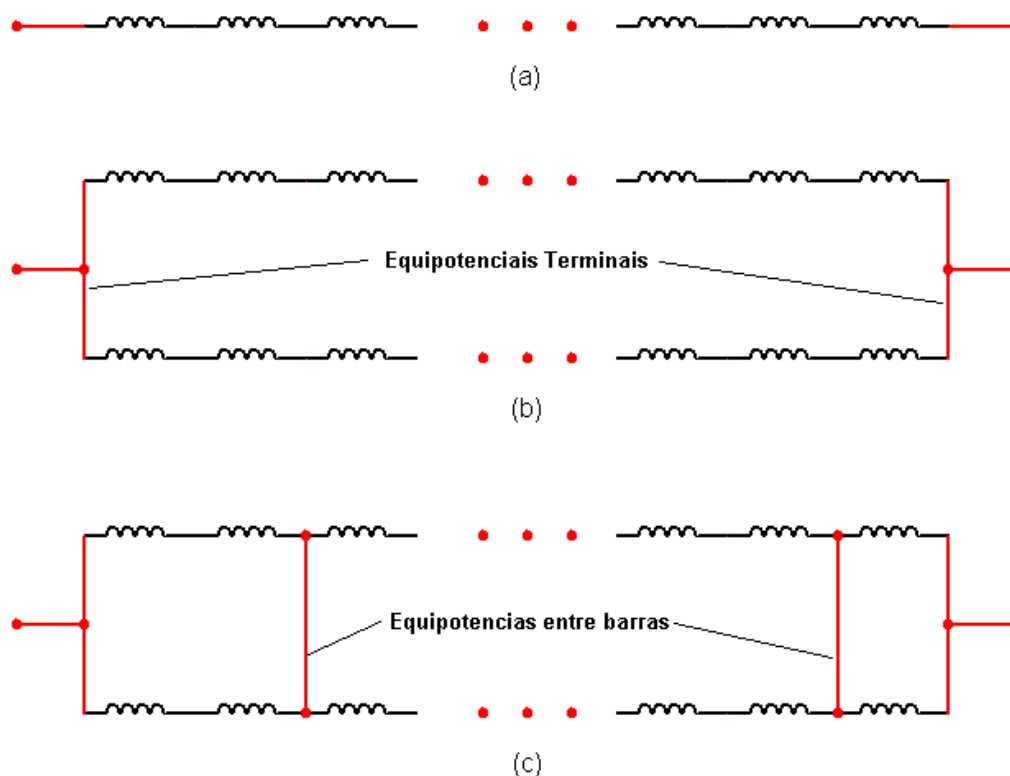


Figura 2.8 – (a) Enrolamento com Bobinas em Série. (b) Enrolamento com Dois Circuitos Paralelos e com Conexões Equipotenciais nos Terminais de Fase e Neutro. (c) Conexões Equipotenciais Entre Barras

A verificação dos possíveis pontos de conexão equipotencial é feita analisando-se o módulo e ângulo do fasor de tensão de cada barra do enrolamento estático. Para tanto o ângulo elétrico entre ranhuras deverá ser conhecido.

A seção seguinte apresenta o cálculo dos fasores de tensão para o gerador em estudo.

## 2.3 O ENROLAMENTO DA UG#11 DE ILHA SOLTEIRA

O enrolamento é do tipo ondulado, em que suas características e do gerador são:

- Potência.....: 170 MVA;
- Tensão de linha.....: 14400 V;
- Frequência.....: 60 Hz;
- Fator de potência.....: 0,95;

- Número de pólos (2p).....: 84;
- Tipo de enrolamento.....: Ondulado;
- Número de ranhuras (Z).....: 540;
- Número de caminhos paralelos.....: 3;
- Número de ranhuras/pólo/fase (q)....:  $2\frac{1}{7}$
- Diâmetro interno estator.....: 13250 mm
- Comprimento estator.....: 1720 mm;
- Entreferro mínimo.....: 17 mm

Tendo o enrolamento estatórico 540 ranhuras distribuindo nas três fases, cada fase é disposta em 180 ranhuras. Como cada fase possui três caminhos paralelos, cada caminho paralelo passará por 60 ranhuras e tendo o enrolamento dupla camada cada circuito paralelo possuirá 120 barras.

Em cada barra do enrolamento haverá uma tensão induzida com seu módulo e ângulo. Estando as barras formando um conjunto de bobinas e estas bobinas ligadas em série com outras bobinas na circunferência do estator, a soma de cada fasor de tensão por barra, bobina e total do circuito paralelo podem ser calculadas. O objetivo é verificar em todo o enrolamento quais os conjuntos de barras que possuem o mesmo fasor de tensão, podendo-se efetuar as conexões equipotenciais.

Desta forma, fixando a ranhura 01 como referência temos, aplicando a equação (3), o ângulo elétricos entre ranhuras será  $28^\circ$ , ou seja,

$$\alpha_e = \frac{60^\circ}{q} = \frac{60}{2\frac{1}{7}} = 28^\circ \quad (28)$$

Por se tratar de um enrolamento com muitas barras, no total de 1080, será ilustrado o cálculo de 31 barras por circuito paralelo da fase A, mostrando a seqüência de suas conexões nas respectivas ranhuras.



Tabela 2.1 – Fasores de tensão fase A, circuito paralelo 1

Número Ranhura	$\alpha_e$ [graus]	Sentido Fasor - $s_j$	Parte Real	Parte Imag.	Soma Parte Real	Soma Parte Imag.	Módulo Soma	Ângulo Soma [graus]
112	3108	-1	0,6691	0,7431	0,6691	0,7431	1,0000	48,0000
119	3304	1	0,4384	0,8988	1,1075	1,6419	1,9805	56,0000
125	3472	-1	0,6157	0,7880	1,7232	2,4299	2,9789	54,6582
132	3668	1	0,3746	0,9272	2,0978	3,3571	3,9587	58,0000
138	3836	-1	0,5592	0,8290	2,6570	4,1862	4,9582	57,5967
145	4032	1	0,3090	0,9511	2,9660	5,1372	5,9320	60,0000
136	3780	-1	1,0000	0,0000	3,9660	5,1372	6,4900	52,3316
143	3976	1	0,9613	0,2756	4,9272	5,4129	7,3196	47,6889
149	4144	-1	0,9976	0,0698	5,9248	5,4826	8,0723	42,7802
156	4340	1	0,9397	0,3420	6,8645	5,8246	9,0027	40,3152
162	4508	-1	0,9903	0,1392	7,8548	5,9638	9,8623	37,2080
169	4704	1	0,9135	0,4067	8,7683	6,3706	10,8382	36,0000
175	4872	-1	0,9781	0,2079	9,7465	6,5785	11,7588	34,0177
182	5068	1	0,8829	0,4695	10,6294	7,0479	12,7537	33,5468
188	5236	-1	0,9613	0,2756	11,5907	7,3236	13,7105	32,2868
195	5432	1	0,8480	0,5299	12,4387	7,8535	14,7105	32,2673
201	5600	-1	0,9397	0,3420	13,3784	8,1955	15,6891	31,4913
208	5796	1	0,8090	0,5878	14,1874	8,7833	16,6862	31,7612
214	5964	-1	0,9135	0,4067	15,1010	9,1900	17,6776	31,3235
221	6160	1	0,7660	0,6428	15,8670	9,8328	18,6667	31,7866
227	6328	-1	0,8829	0,4695	16,7500	10,3023	19,6647	31,5942
234	6524	1	0,7193	0,6947	17,4693	10,9970	20,6424	32,1905
240	6692	-1	0,8480	0,5299	18,3174	11,5269	21,6424	32,1817
247	6888	1	0,6691	0,7431	18,9865	12,2700	22,6062	32,8726
253	7056	-1	0,8090	0,5878	19,7955	12,8578	23,6048	33,0050
260	7252	1	0,6157	0,7880	20,4112	13,6458	24,5525	33,7646

266	7420	-1	0,7660	0,6428	21,1772	14,2886	25,5468	34,0082
<b>273</b>	7616	1	0,5592	0,8290	21,7364	15,1176	26,4767	34,8186
279	7784	-1	0,7193	0,6947	22,4557	15,8123	27,4643	35,1514
<b>286</b>	7980	1	0,5000	0,8660	22,9557	16,6783	<b>28,3749</b>	<b>36,0000</b>
292	8148	-1	0,6691	0,7431	23,6249	17,4215	29,3537	36,4058

O sentido do fasor  $s_j$  na tabela 2.1 representa o sentido da corrente na barra, sendo o valor positivo a corrente “entrando” na barra e o valor negativo a corrente “saindo” da barra. Os valores da parte real e parte imaginária do fasor são multiplicados por  $s_j$ .

Na figura 2.9 a corrente sai da barra superior na ranhura 112, no terminal 2U2.

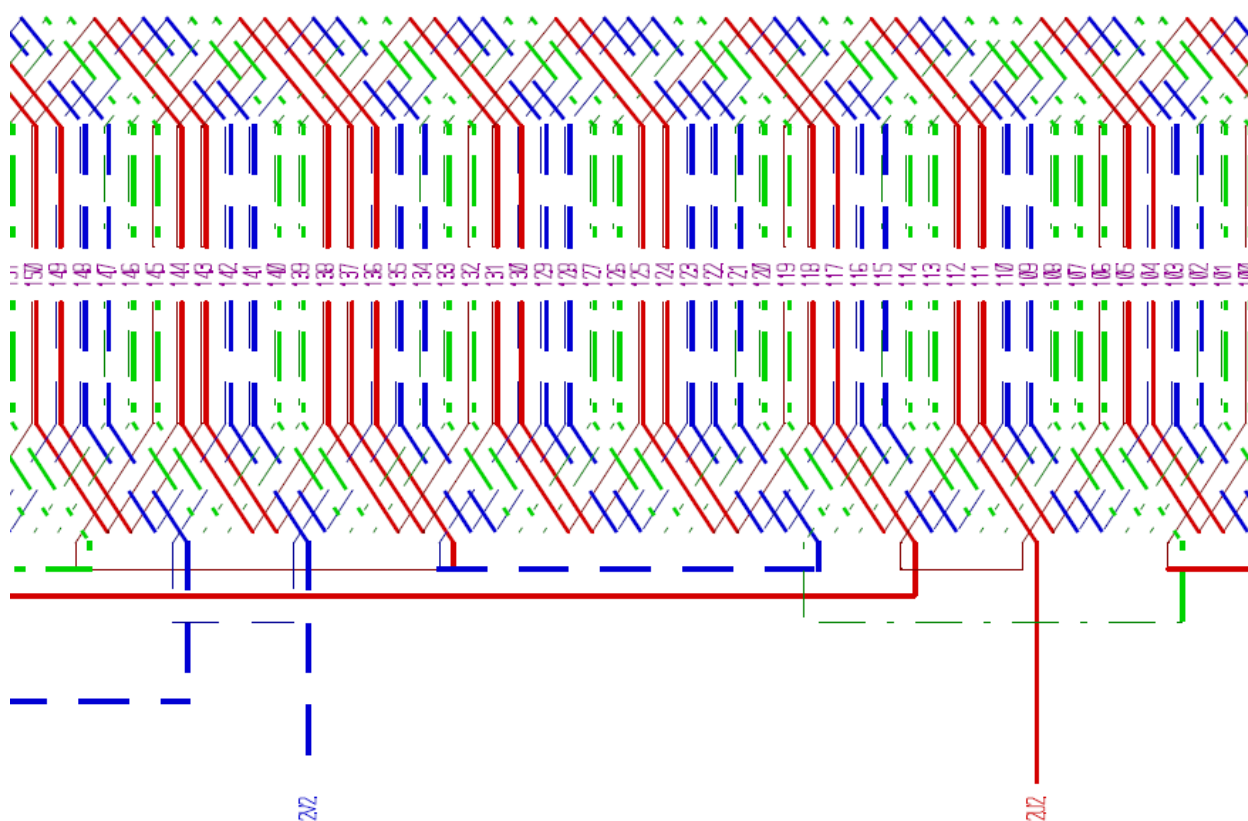


Figura 2.9 – Fragmento esquema de bobinação UG#11 ILS – fase A vermelho

Na tabela 2.1 as ranhuras em negrito representam as barras superiores e as ranhuras em itálico as barras inferiores. Na figura 2.9 as barras superiores possuem traço em negrito e as barras inferiores não.

A parte real e a parte imaginária são obtidas através do co-seno e do seno do ângulo elétrico, sendo  $\alpha_e$  calculado subtraindo à ranhura calculada a ranhura de referência 01.

$$Parte\_Real = \cos(\alpha_e) \cdot sentido\_fasor \quad (29)$$

$$Parte\_Imaginária = \sin(\alpha_e) \cdot sentido\_fasor \quad (30)$$

$$Módulo\_Soma = \sqrt{(Soma\_Parte\_Real)^2 + (Soma\_Parte\_Imaginária)^2} \quad (31)$$

$$Argumento\_Soma = a \tan\left(\frac{Soma\_Parte\_Real}{Soma\_Parte\_Imaginária}\right) \quad (32)$$

A barra inferior alocada na ranhura 286 possui como fasor de tensão resultante módulo 28,3749 V e ângulo 36,0°, resultado da soma de cada tensão por barra. Como mencionado cada circuito paralelo possui 120 barras em série e a soma fasorial continua até o fechamento do neutro.

Os circuitos paralelos dois e três serão mostrados nas tabelas 2.2 e 2.3 respectivamente, onde é possível verificar que a barra superior na ranhura 361 e a barra inferior na ranhura 183 possuem o mesmo fasor de tensão, definindo então uma conexão equipotencial.

Tabela 2.2 – Fasores de tensão fase A, circuito paralelo 2

Número Ranhura	$\alpha_e$ [graus]	Sentido Fasor	Parte Real	Parte Imag.	Soma Parte Real	Soma Parte Imag.	Módulo Soma	Ângulo Soma [graus]
<b>10</b>	252	-1	0,3090	0,9511	0,3090	0,9511	1,0000	72,0000
<b>3</b>	56	1	0,5592	0,8290	0,8682	1,7801	1,9805	64,0000
<b>537</b>	15008	-1	0,3746	0,9272	1,2428	2,7073	2,9789	65,3418
<b>530</b>	14812	1	0,6157	0,7880	1,8585	3,4953	3,9587	62,0000
<b>524</b>	14644	-1	0,4384	0,8988	2,2968	4,3941	4,9582	62,4033
<b>517</b>	14448	1	0,6691	0,7431	2,9660	5,1372	5,9320	60,0000
<b>511</b>	14280	-1	0,5000	0,8660	3,4660	6,0033	6,9320	60,0000

504	14084	1	0,7193	0,6947	4,1853	6,6979	7,8980	58,0000
498	13916	-1	0,5592	0,8290	4,7445	7,5269	8,8975	57,7753
491	13720	1	0,7660	0,6428	5,5106	8,1697	9,8545	56,0000
485	13552	-1	0,6157	0,7880	6,1262	8,9577	10,8523	55,6317
478	13356	1	0,8090	0,5878	6,9352	9,5455	11,7989	54,0000
472	13188	-1	0,6691	0,7431	7,6044	10,2887	12,7939	53,5319
465	12992	1	0,8480	0,5299	8,4524	10,8186	13,7290	52,0000
459	12824	-1	0,7193	0,6947	9,1718	11,5133	14,7199	51,4583
452	12628	1	0,8829	0,4695	10,0547	11,9827	15,6423	50,0000
446	12460	-1	0,7660	0,6428	10,8207	12,6255	16,6281	49,4016
439	12264	1	0,9135	0,4067	11,7343	13,0323	17,5366	48,0000
433	12096	-1	0,8090	0,5878	12,5433	13,6200	18,5159	47,3566
426	11900	1	0,9397	0,3420	13,4830	13,9621	19,4095	46,0000
420	11732	-1	0,8480	0,5299	14,3310	14,4920	20,3813	45,3199
413	11536	1	0,9613	0,2756	15,2923	14,7676	21,2588	44,0000
407	11368	-1	0,8829	0,4695	16,1753	15,2371	22,2218	43,2893
400	11172	1	0,9781	0,2079	17,1534	15,4450	23,0822	42,0000
394	11004	-1	0,9135	0,4067	18,0670	15,8517	24,0352	41,2633
387	10808	1	0,9903	0,1392	19,0572	15,9909	24,8774	40,0000
381	10640	-1	0,9397	0,3420	19,9969	16,3329	25,8194	39,2410
374	10444	1	0,9976	0,0698	20,9945	16,4027	26,6424	38,0000
368	10276	-1	0,9613	0,2756	21,9557	16,6783	27,5721	37,2215
361	10080	1	1,0000	0,0000	22,9557	16,6783	<u>28,3749</u>	<u>36,0000</u>
370	10332	-1	0,3090	0,9511	23,2648	17,6294	29,1898	37,1538

Mesmo possuindo distribuição e localização diferente, a barra superior na ranhura 361 pode ser conectada com a barra inferior da ranhura 286, já que possuem a mesma tensão, tanto em módulo como em fase.

Tabela 2.3 – Fasores de tensão fase A, circuito paralelo 3

Número Ranhura	$\alpha_e$ [graus]	Sentido Fasor	Parte Real	Parte Imag.	Soma Parte Real	Soma Parte Imag.	Módulo Soma	Ângulo Soma [graus]
9	224	-1	0,7193	0,6947	0,7193	0,6947	1,0000	44,0000
16	420	1	0,5000	0,8660	1,2193	1,5607	1,9805	52,0000
22	588	-1	0,6691	0,7431	1,8885	2,3038	2,9789	50,6582
29	784	1	0,4384	0,8988	2,3268	3,2026	3,9587	54,0000
35	952	-1	0,6157	0,7880	2,9425	3,9906	4,9582	53,5967
42	1148	1	0,3746	0,9272	3,3171	4,9178	5,9320	56,0000
48	1316	-1	0,5592	0,8290	3,8763	5,7469	6,9320	56,0000
55	1512	1	0,3090	0,9511	4,1853	6,6979	7,8980	58,0000
46	1260	-1	1,0000	0,0000	5,1853	6,6979	8,4705	52,2541
53	1456	1	0,9613	0,2756	6,1466	6,9735	9,2957	48,6066
59	1624	-1	0,9976	0,0698	7,1441	7,0433	10,0323	44,5928
66	1820	1	0,9397	0,3420	8,0838	7,3853	10,9495	42,4146
72	1988	-1	0,9903	0,1392	9,0741	7,5245	11,7880	39,6665
79	2184	1	0,9135	0,4067	9,9877	7,9312	12,7537	38,4532
85	2352	-1	0,9781	0,2079	10,9658	8,1391	13,6563	36,5839
92	2548	1	0,8829	0,4695	11,8487	8,6086	14,6459	36,0000
98	2716	-1	0,9613	0,2756	12,8100	8,8843	15,5893	34,7429
105	2912	1	0,8480	0,5299	13,6581	9,4142	16,5882	34,5776
111	3080	-1	0,9397	0,3420	14,5977	9,7562	17,5578	33,7562
118	3276	1	0,8090	0,5878	15,4068	10,3440	18,5571	33,8771
124	3444	-1	0,9135	0,4067	16,3203	10,7507	19,5430	33,3742
131	3640	1	0,7660	0,6428	17,0864	11,3935	20,5367	33,6961
137	3808	-1	0,8829	0,4695	17,9693	11,8630	21,5320	33,4320
144	4004	1	0,7193	0,6947	18,6886	12,5576	22,5158	33,8987
150	4172	-1	0,8480	0,5299	19,5367	13,0876	23,5152	33,8180
157	4368	1	0,6691	0,7431	20,2058	13,8307	24,4860	34,3913

163	4536	-1	0,8090	0,5878	21,0148	14,4185	25,4856	34,4544
170	4732	1	0,6157	0,7880	21,6305	15,2065	26,4408	35,1077
176	4900	-1	0,7660	0,6428	22,3965	15,8493	27,4373	35,2858
183	5096	1	0,5592	0,8290	22,9557	16,6783	<b>28,3749</b>	<b>36,0000</b>
189	5264	-1	0,7193	0,6947	23,6751	17,3730	29,3655	36,2715

Estas conexões estão representadas na figura 2.10. Nesta figura a primeira linha de números, de 1 a 31, representa o número da barra por circuito paralelo; note que a conexão equipotencial é realizada na trigésima barra de cada circuito, estando todas ligadas em série. As demais linhas representam os circuitos paralelos 1, 2 e 3 na seqüência de cima para baixo.

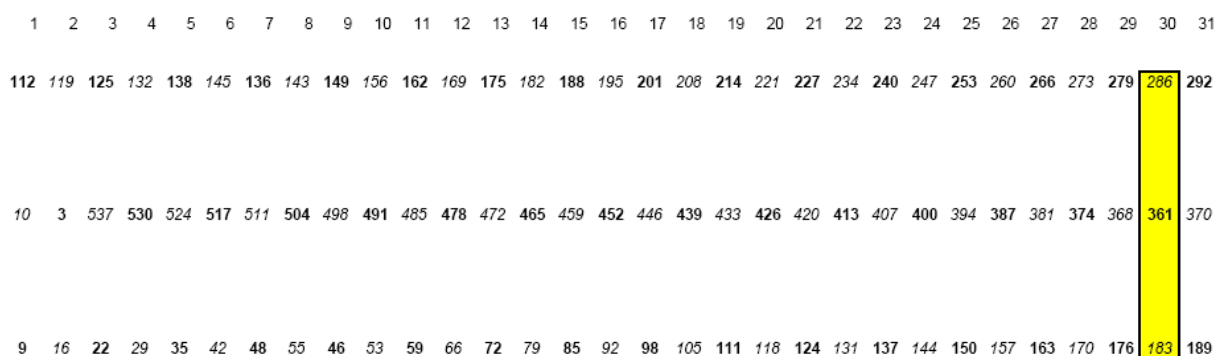


Figura 2.10 – Conexão equipotencial 1 – 30ª barras

Fazendo-se esta análise para o restante das barras da fase A e para as barras das demais fases, obtêm-se os pontos de conexão equipotencial abaixo. A seqüência dos números são os circuitos paralelos 1, 2 e 3 respectivamente, melhor visualizado na figuras 2.11, 2.12 e 2.13.

- Fase A:

*Conexão equipotencial 1: 286 – 361 – 183*

*Conexão equipotencial 2: 466 – 363*

*Conexão equipotencial 3: 106 – 181*

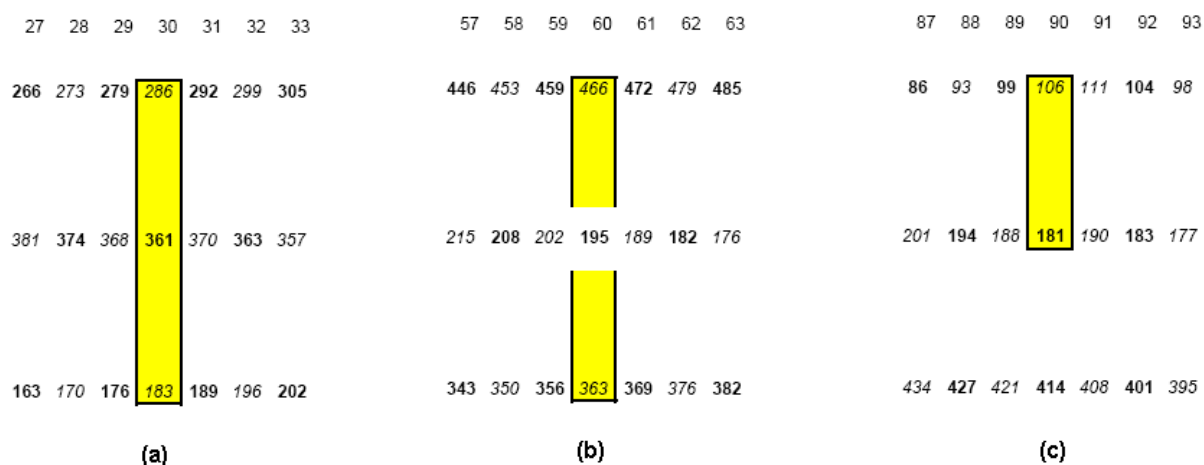


Figura 2.11 – Conexões equipotenciais fase A

- Fase B:

*Conexão equipotencial 4: 358 – 346 – 357*

*Conexão equipotencial 5: 178 – 166 – 345*



Figura 2.12 – Conexões equipotenciais fase B

- Fase C:

*Conexão equipotencial 6: 367 – 174 – 316*

*Conexão equipotencial 7: 354 – 496*

*Conexão equipotencial 8: 187 – 136*

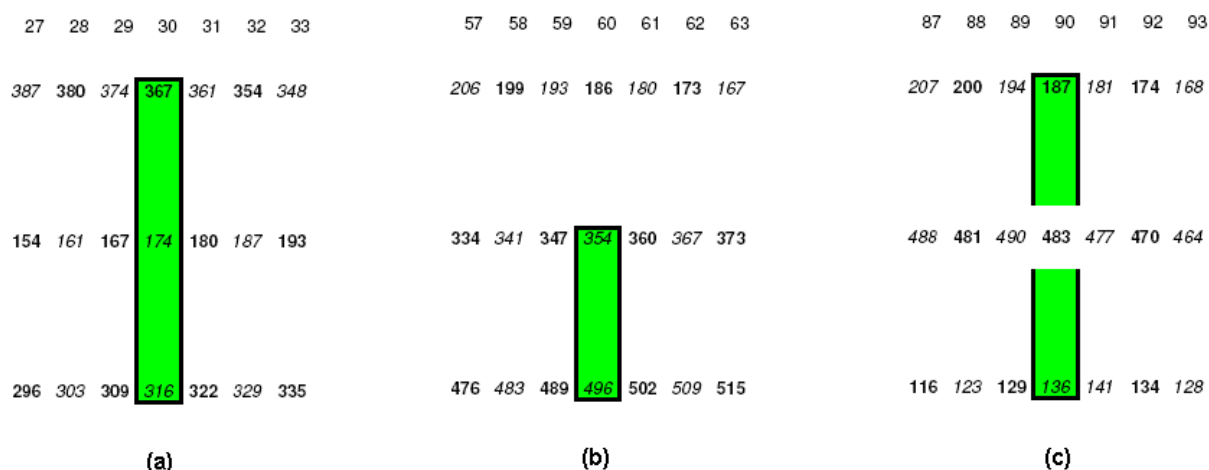


Figura 2.13 – Conexões equipotenciais fase C

Portanto, são definidos oito pontos de conexões equipotenciais. Esses pontos de conexão criarão outros caminhos para a circulação de corrente no estator e essas correntes irão alterar a força magneto motriz de reação de armadura e conseqüentemente a indução resultante no entreferro.

A magnitude destas correntes está diretamente ligada à tensão que aparecerá em cada ramo do circuito e esta tensão é dependente do valor do entreferro que existe entre estator e rotor. Desta forma, a análise da excentricidade torna-se relevante, e é abordada no próximo capítulo.



### 3 EXCENTRICIDADE E SEUS EFEITOS

#### 3.1 VARIAÇÃO DE PARÂMETROS DEVIDO A EXCENTRICIDADE

Neste trabalho todo tratamento matemático é baseado em uma excentricidade estática. A excentricidade estática ocorre quando há um deslocamento entre o centro do estator e o centro do rotor. É definido  $\varepsilon$  como uma relação entre o deslocamento absoluto, em milímetros deste centro, pelo valor do entreferro nominal, como verificado na figura 3.1. Para este trabalho  $\varepsilon$  é fixado em 10 % do valor do entreferro, ou seja,  $\varepsilon = 0,1$ .

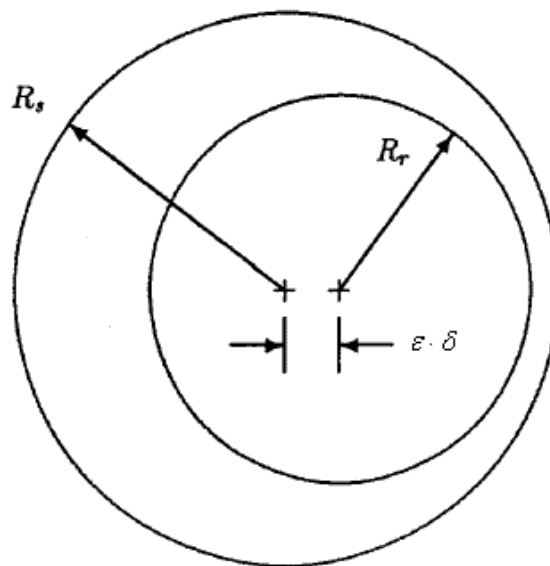


Figura 3.1 – Deslocamento do Centro Rotor - Excentricidade Estática

A variação do entreferro  $\delta$  acarreta uma série de alterações na máquina, começando com a variação do campo magnético  $H$ , fluxo magnético dos pólos  $\Phi_p$ , até a tensão induzida por barra no enrolamento do estator, como pode ser verificado na definição das equações (8) a (16).

Na região de menor entreferro haverá um aumento da indução e conseqüente aumento da tensão nos terminais das bobinas à frente deste entreferro; por outro lado haverá uma diminuição da indução na região de maior entreferro, com conseqüente diminuição de tensão.

Em cada posição angular  $\theta$  do rotor haverá um determinado entreferro, desta forma define-se um entreferro variável dependente da excentricidade e do ângulo  $\theta$ .

$$\delta(\theta) = \delta \cdot [1 - \varepsilon \cdot \cos(\theta)] \quad (33)$$

As alterações nas equações (10) e (16) seguem abaixo e os gráficos seguintes ilustram esta dependência do ângulo  $\theta$ .

$$B(\theta) = \frac{\mu_0}{2 \cdot \delta(\theta)} \cdot 2 \cdot N_f \cdot I_f \quad (34)$$

$$E_f(\theta) = \frac{\sqrt{2} \cdot \pi}{p} \cdot f \cdot L_f \cdot D_\delta \cdot B(\theta) \quad (35)$$

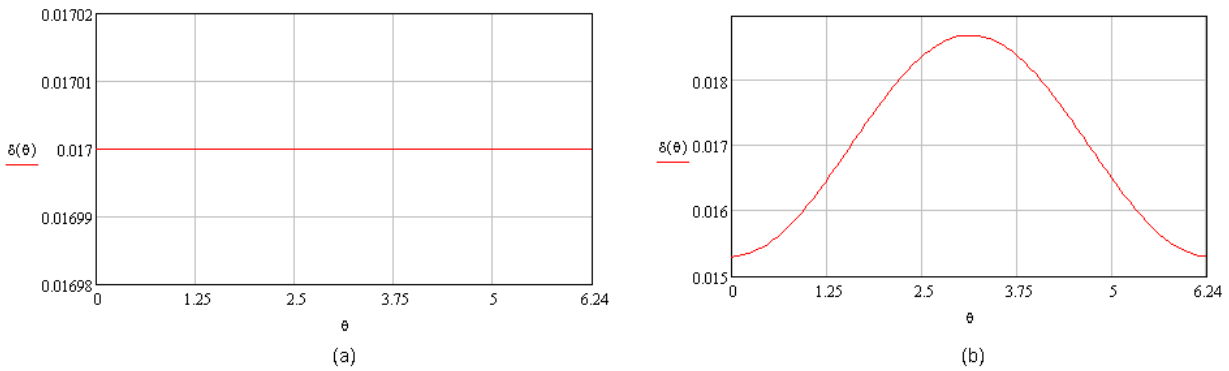


Figura 3.2 – (a) Entreferro constante – (b) Entreferro função da excentricidade

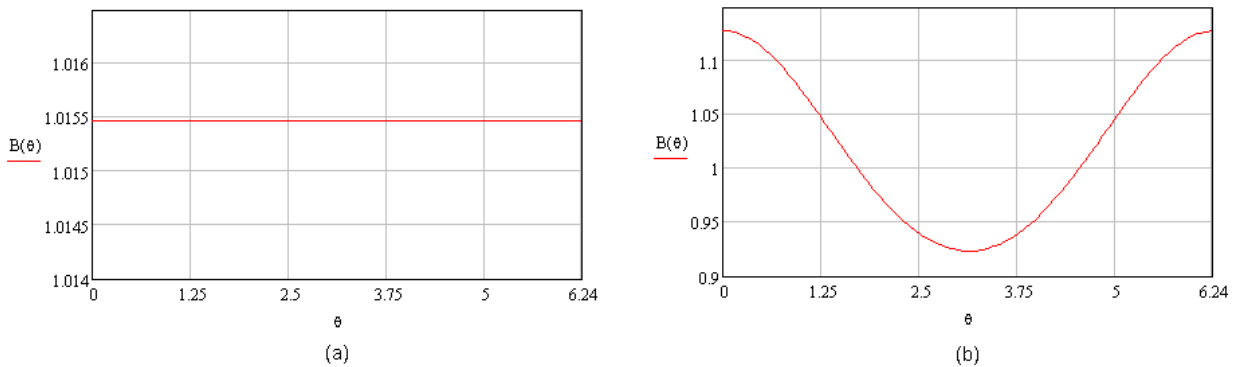


Figura 3.3 – (a) Indução Magnética entreferro constante – (b) Indução função da excentricidade

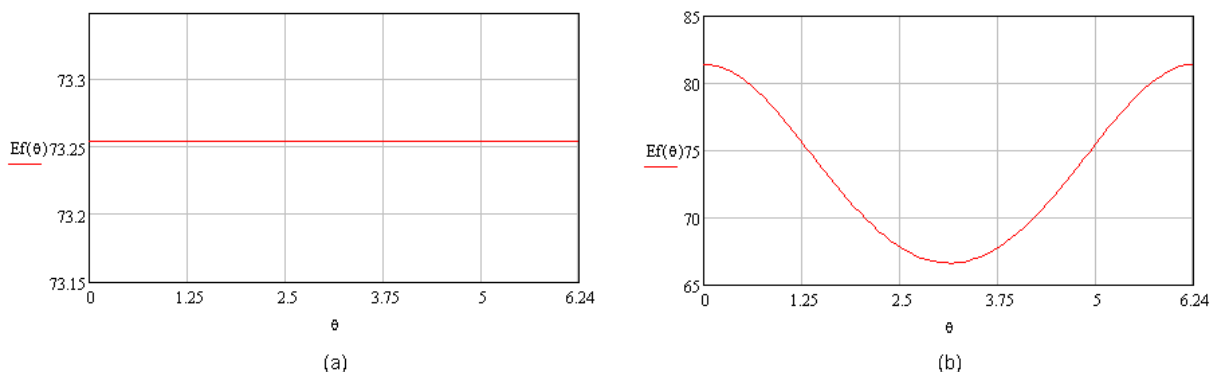


Figura 3.4 – (a) Tensão induzida barras estatóricas entreferro constante – (b) Tensão função da excentricidade

As tensões induzidas por barras serão importantes para definir as tensões por paralelo para verificar o surgimento das correntes de circulação, que é visto em detalhe no próximo capítulo.

A não uniformidade nos valores da indução magnética do entreferro leva a diferentes valores de atração magnética entre estator e rotor, causa do surgimento do empuxo magnético desbalanceado.

## 3.2 O EFEITO DA SATURAÇÃO

Como mostra a figura 3.3b, há uma variação na indução magnética no entreferro. Esta variação faz com que o estado de saturação da máquina seja também variável e a equação (34) pode nos trazer valores de induções para determinados entreferros que não são reais, devido a esta característica de saturação de toda máquina elétrica.

Na operação normal dos geradores síncronos não se varia constantemente a corrente de excitação por conta das pequenas variações de tensão interna devido a excentricidade. Na realidade a corrente de excitação é ajustada em função da carga do gerador, que ocasiona perturbações na tensão terminal.

Se a excitação se mantém constante, a força magnetomotriz gerada será a mesma para um entreferro maior ou menor, ocasionando que o núcleo do estator adquira estados mais ou menos saturados.

Para contornar este problema traçaram-se três curvas de indução: com entreferro nominal (17,0 mm), com entreferro máximo, 10% superior (18,7 mm) e entreferro mínimo, 10% menor (15,3 mm). O objetivo é obter uma equação que relacione a indução magnética com a variação do entreferro levando-se em conta o efeito da saturação.

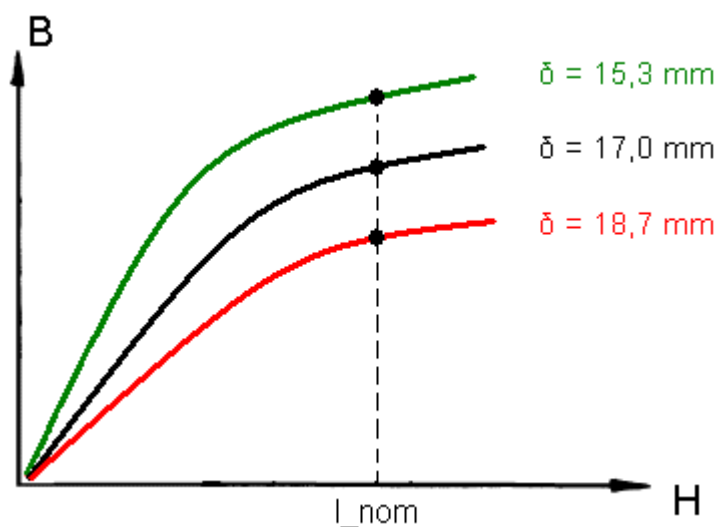


Figura 3.5 – Diferentes estados de saturação do gerador em função da variação do entreferro

Trançando um gráfico que relacione a indução magnética  $B$  com o entreferro e sua variação angular, obtém-se uma equação que leva em conta o efeito da saturação do gerador e sua excentricidade. Os valores de indução foram obtidos com o auxílio do programa de cálculo de máquinas síncronas da Alstom.

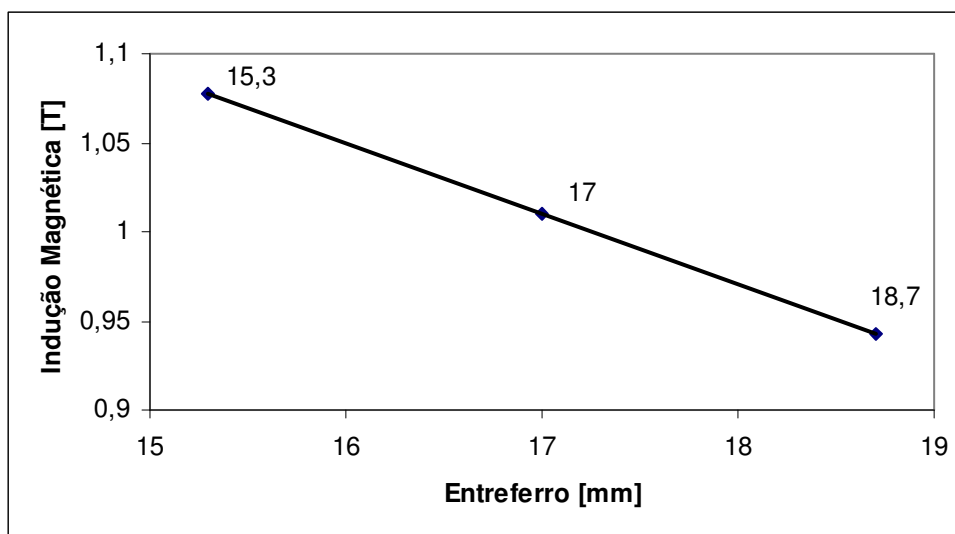


Figura 3.6 – Indução magnética em função do entreferro

A equação da indução que relaciona o estado de saturação do gerador e a variação angular do entreferro ou a excentricidade é:

$$B(\theta) = -0,0397 \cdot [\delta \cdot (1 - \varepsilon \cdot \cos(\theta))] + 1,6805 \quad (36)$$

De posse da equação (36) e da equação (35) podem-se calcular as tensões induzidas em cada barra para verificar o surgimento das correntes de circulação.

## 4 CORRENTES DE CIRCULAÇÃO

Estando cada barra estatórica à frente de diferentes entreferros, as tensões geradas nestas barras serão também diferentes, fazendo com que as tensões resultantes nos fechamentos, do neutro e da fase, não sejam mais iguais. Assim entre os caminhos paralelos haverá uma diferença de potencial, surgindo uma circulação de correntes entre estes caminhos; a essas correntes dá-se o nome de correntes de circulação.

Essas correntes modificam a amplitude da força magnetomotriz de reação de armadura, equações (23) e (24), que por sua vez alteram a indução magnética no entreferro, equação (13).

Como elas agem diretamente na indução, são importantes ferramentas para mitigar o empuxo magnético desbalanceado.

Verificar-se-á verificar a amplitude destas correntes em duas situações: com o enrolamento do estator com três caminhos paralelos, da forma como foi concebido originalmente; e com o enrolamento com a inserção das conexões equipotenciais, conforme descrito no Capítulo 2, para criar novos caminhos para a circulação de corrente.

### 4.1 ENROLAMENTO ESTATÓRICO ORIGINAL

O gerador da unidade 11 da usina hidroelétrica de Ilha Solteira possui três caminhos paralelos. Estando esses caminhos totalmente equilibrados não há correntes circulando entre eles.

Todavia devido a excentricidade, as tensões induzidas nas barras não são todas iguais, e o somatório das tensões em todas as barras em série de um caminho paralelo resulta diferente de uma para a outra. Com isto uma corrente começa a circular do

maior para o menor potencial. A figura 4.1 ilustra os caminhos paralelos para as três fases.

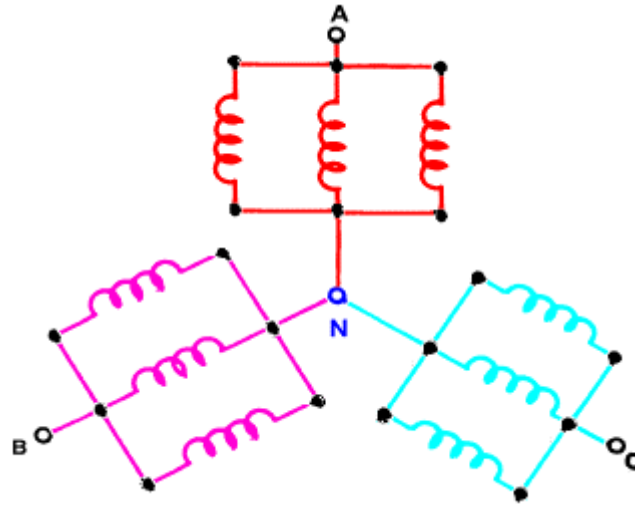


Figura 4.1 – Três Circuitos Paralelos do Enrolamento Estatórico

Cada circuito por fase possui 120 barras, como descrito na seção 2.3. A soma vetorial da tensão nestas barras resulta na tensão resultante por circuito. Usando as equações (10) e (16) calcula-se a tensão por barra. A soma vetorial destas tensões é feita com o auxílio das equações de (29) a (32), multiplicando-se a equação (16) em (29) e (30).

$$Parte\_Real = \left( \frac{\sqrt{2} \cdot \pi}{p} \cdot f \cdot L_f \cdot D_s \cdot B(\theta) \right) \cdot \cos(\alpha_e) \cdot sentido\_fasor \quad (37)$$

$$Parte\_Imaginária = \left( \frac{\sqrt{2} \cdot \pi}{p} \cdot f \cdot L_f \cdot D_s \cdot B(\theta) \right) \cdot \sin(\alpha_e) \cdot sentido\_fasor \quad (38)$$

O ângulo  $\theta$  nas equações acima é o ângulo mecânico de cada ranhura na circunferência do estator, ou seja, tendo a circunferência  $360^\circ$  e o enrolamento 540 ranhuras, cada ranhura terá  $\theta = 0,67^\circ$  mecânicos. A referência adotada está na ranhura 01.

A figura 4.2 ilustra o circuito paralelo de uma fase e suas correntes de circulação. São mostradas no circuito da figura as correntes de malha e de ramo. Nosso interesse está nas correntes de ramo, que são as correntes que efetivamente circulam pelas barras e alteram a FMRA.

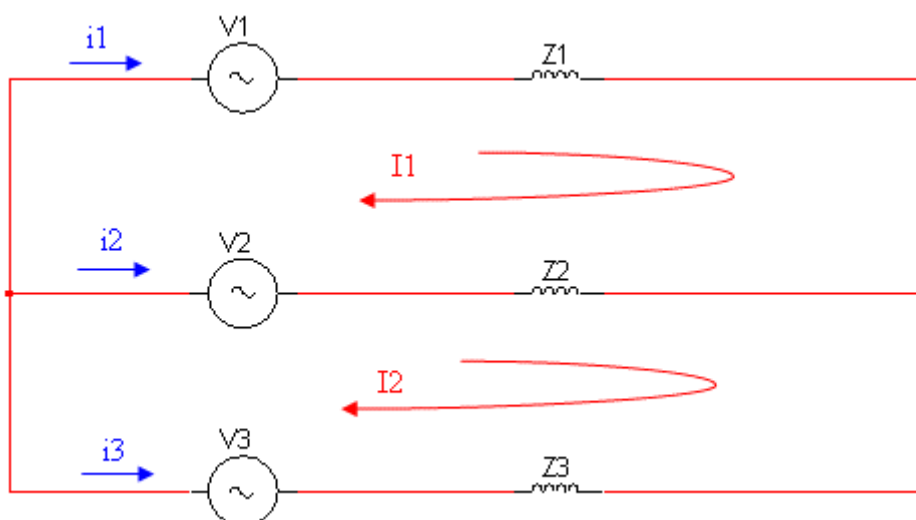


Figura 4.2 – Circuito Equivalente - Correntes de Malha e de Ramo de um Circuito Paralelo de uma Fase

Na figura 4.2:

$I_1, I_2$  – correntes de malha;

$i_1, i_2, i_3$  – correntes de ramo;

$V_1, V_2, V_3$  – tensão resultante por caminho paralelo;

$Z_1, Z_2, Z_3$  – impedância do circuito paralelo;

$Z_1 = Z_2 = Z_3$ . Vinculada à reatância de dispersão<sup>1</sup>.

As impedâncias respectivas são:

$$X\lambda = 0,1953 \quad [\text{p.u.}]$$

$$Z_1 = 3 \cdot X\lambda \quad [\text{p.u.}]$$

$$Z_{base} = 1,2198 \quad [\text{ohm}]$$

$$Z_{barra} = \frac{Z_1}{120} \cdot Z_{base} \Rightarrow Z_{barra} = 5,96 \cdot 10^{-3} \quad [\text{ohm}]$$

Seguindo a 2ª lei de Kirchhoff, lei das malhas, para o cálculo das correntes no circuito da figura 3.8 tem-se a equação matricial como segue:

---

<sup>1</sup> Resistência da barra  $\ll$  Reatância de dispersão  $X\ell$ , portanto desconsiderada.



$$\begin{pmatrix} V_1 - V_2 \\ V_2 - V_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_1 + Z_2 & -Z_2 \\ -Z_2 & Z_2 + Z_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad (39)$$

Como o circuito da figura 3.8 é o mesmo para as três fases, sendo a mesma também a impedância de cada barra, somente os valores das tensões V1, V2 e V3 serão ser diferentes. Desta forma a equação (39) será a mesma para as três fases.

Os valores das tensões, correntes de malha e de ramo seguem abaixo:

Tabela 4.1 – Parâmetros do Circuito Equivalente - Enrolamento Original

	FASE A	FASE B	FASE C
<b>V1 [V]</b>	8422	8209	8201
<b>V2 [V]</b>	8230	8330	8374
<b>V3 [V]</b>	8291	8207	8368
<b>I1 [A]</b>	151	-56	-159
<b>I2 [A]</b>	33	58	-75
<b>i1 [A]</b>	<b><i>151</i></b>	<b><i>-56</i></b>	<b><i>-159</i></b>
<b>i2 [A]</b>	<b><i>- 118</i></b>	<b><i>114</i></b>	<b><i>84</i></b>
<b>i3 [A]</b>	<b><i>-33</i></b>	<b><i>-58</i></b>	<b><i>75</i></b>

O sinal negativo nas correntes de ramo indica que elas estão no sentido oposto ao representado na figura 3.8, mostrando que as correntes vão do maior para o menor potencial.

O sentido da corrente é muito importante para o cálculo da FMRA, pois faz com que a indução resultado da reação da armadura seja subtraída ou adicionada à indução do campo dos pólos para a formação da indução resultante no entreferro. É esta indução resultante que definirá a magnitude do empuxo magnético desbalanceado.

## 4.2 ENROLAMENTO ESTATÓRICO COM CONEXÕES EQUIPOTENCIAIS

A inserção das novas conexões entre circuitos paralelos da mesma fase faz com que surjam novos “caminhos paralelos” para a circulação de corrente.

Estas conexões devem ser feitas levando-se em conta a amplitude e o ângulo de fase de cada vetor unitário da composição da tensão terminal do gerador. Cada barra do enrolamento estatórico, alojada em sua respectiva ranhura tem uma amplitude de tensão e um ângulo de fase, definindo um vetor.

Fazendo a varredura de todo enrolamento estatórico, como demonstrado no capítulo 2, verifica-se quais barras da mesma fase possuem o mesmo vetor nos diferentes circuitos paralelos. Para este estudo foram 4 pontos de conexão por fase, criando outras malhas no circuito da figura 4.2.

Para o circuito da fase A, seguindo as conexões equipotenciais da figura 2.11, tem-se o circuito da figura 4.3.

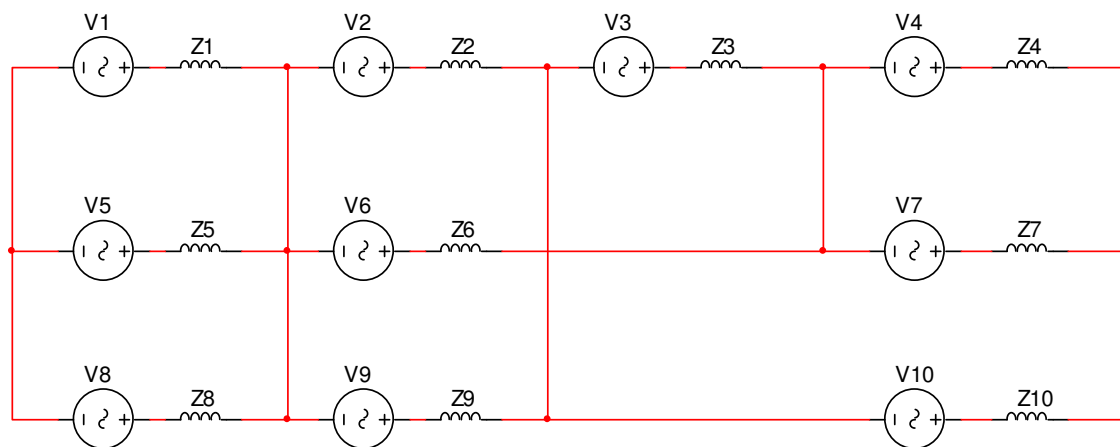


Figura 4.3 – Circuito Equivalente Fase A com suas Conexões Equipotenciais

As novas conexões da fase A criaram 6 malhas, originando 6 correntes de malha e 10 correntes de ramos. Para cada malha, tem-se um número definido de barras estatóricas e a soma fasorial destas tensões estabelece as tensões de malha.

O circuito da figura 4.3 terá a seguinte equação matricial para sua resolução:

$$\begin{pmatrix} V1-V5 \\ V2-V9 \\ V3-V6+V2 \\ V4-V7 \\ V5-V8 \\ V6+V7-V10-V9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z1+Z5 & 0 & 0 & 0 & -Z5 & 0 \\ 0 & Z2+Z9 & Z2 & 0 & 0 & Z9 \\ 0 & Z2 & Z2+Z3+Z6 & 0 & 0 & -Z6 \\ 0 & 0 & 0 & Z4+Z7 & 0 & -Z7 \\ -Z5 & 0 & 0 & 0 & Z5+Z8 & 0 \\ 0 & Z9 & -Z6 & -Z7 & 0 & Z6+Z7+Z10+Z9 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I1 \\ I2 \\ I3 \\ I4 \\ I5 \\ I6 \end{pmatrix} \quad (40)$$

Os valores das tensões de malha, das impedâncias, correntes de malha e de ramo são mostrados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros do Circuito Equivalente – Enrolamento com Conexões Equipotenciais – Fase A

Tensão Malha [V]		Impedância Malha [ohm]		Corrente Malha [A]		Corrente de Ramo [A]	
V1	2005	Z1	30*Zb	I1	-489	i1	-489
V2	2039	Z2	30*Zb	I2	-107	i2	373
V3	2191	Z3	30*Zb	I3	480	i3	480
V4	2186	Z4	30*Zb	I4	236	i4	236
V5	2139	Z5	30*Zb	I5	-228	i5	261
V6	3961	Z6	60*Zb	I6	154	i6	-326
V7	2129	Z7	30*Zb			i7	-82
V8	2133	Z8	30*Zb			i8	228
V9	1964	Z9	30*Zb			i9	-47
V10	4194	Z10	60*Zb			i10	-154

Verifica-se que as impedâncias Z6 e Z10 são constituídas por 60 barras, resultando daí uma soma fasorial de tensão maior que nas demais impedâncias, que possuem 30 barras.

O sinal positivo para as correntes de ramo é definido para as correntes fluindo para a direita no circuito equivalente da figura 4.3. O sinal negativo são para as correntes fluindo no sentido oposto e representa que houve uma mudança no sentido da corrente. Deve-se isto ao fato de que as correntes fluem do maior para o menor potencial e esta alteração de sentido é primordial para a mitigação do UMP, já que se a corrente se inverte, inverte-se também a FMRA. Veremos mais detalhadamente no Capítulo 5 a influência da corrente de circulação sobre a indução magnética resultante no entreferro.

Para o circuito da fase B, seguindo as conexões equipotenciais da figura 2.12, tem-se o circuito da figura 4.4.

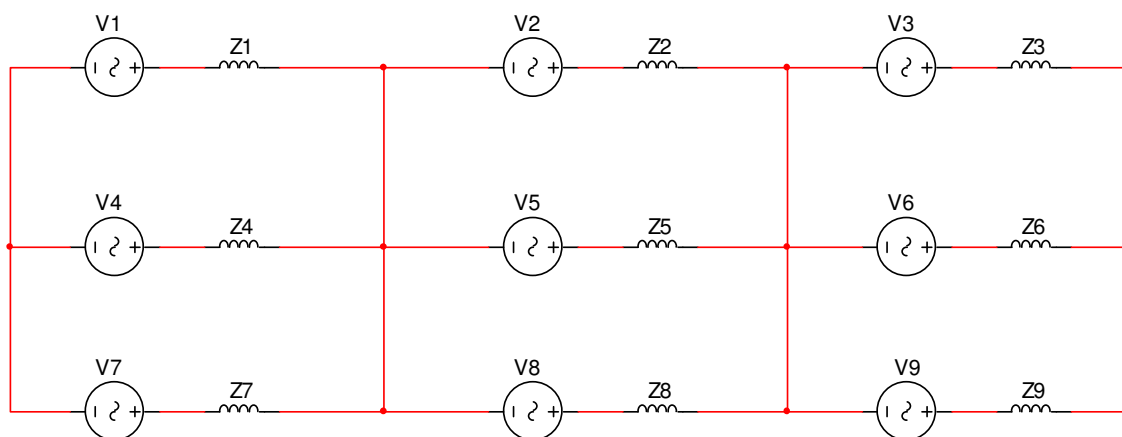


Figura 4.4 – Circuito Equivalente Fase B com suas Conexões Equipotenciais

As novas conexões da fase B criaram também 6 malhas, originando 6 correntes de malha e 9 correntes de ramos. Para cada malha, tem-se um número definido de barras estáticas e a soma fasorial destas tensões estabelece as tensões de malha.

O circuito da figura 4.4 terá a seguinte equação matricial para sua resolução:

$$\begin{pmatrix} V1-V4 \\ V2-V5 \\ V3-V6 \\ V4-V7 \\ V5-V8 \\ V6-V9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z1+Z4 & 0 & 0 & -Z4 & 0 & 0 \\ 0 & Z2+Z5 & 0 & 0 & -Z5 & 0 \\ 0 & 0 & Z3+Z6 & 0 & 0 & -Z6 \\ -Z4 & 0 & 0 & Z4+Z7 & 0 & 0 \\ 0 & -Z5 & 0 & 0 & Z5+Z8 & 0 \\ 0 & 0 & -Z6 & 0 & 0 & Z6+Z9 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I1 \\ I2 \\ I3 \\ I4 \\ I5 \\ I6 \end{pmatrix} \quad (41)$$

Os valores das tensões de malha, das impedâncias, correntes de malha e de ramo são mostrados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Parâmetros do Circuito Equivalente – Enrolamento com Conexões Equipotenciais – Fase B

Tensão Malha [V]		Impedância Malha [ohm]		Corrente Malha [A]		Corrente de Ramo [A]	
V1	2128	Z1	30*Zb	I1	295	i1	295
V2	3929	Z2	60*Zb	I2	-489	i2	-489
V3	2144	Z3	30*Zb	I3	52	i3	52
V4	1966	Z4	30*Zb	I4	-317	i4	-612
V5	4269	Z5	60*Zb	I5	-26	i5	463
V6	2138	Z6	30*Zb	I6	71	i6	19
V7	2132	Z7	30*Zb			i7	317
V8	4113	Z8	60*Zb			i8	26
V9	2122	Z9	30*Zb			i9	-71

Para o circuito da fase C, seguindo as conexões equipotenciais da figura 2.13, tem-se o circuito da figura 4.5.

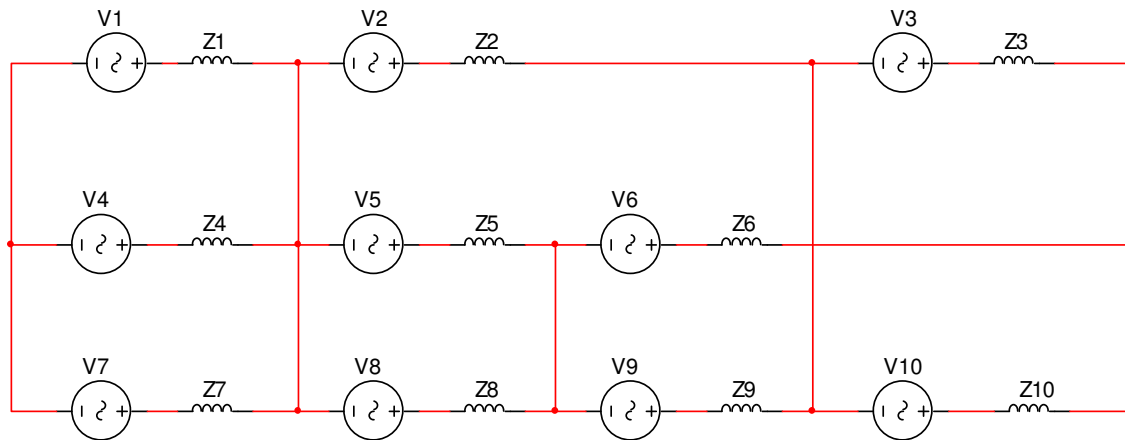


Figura 4.5 – Circuito Equivalente Fase C com suas Conexões Equipotenciais

As novas conexões da fase C criaram outras 6 malhas, originando 6 correntes de malha e 10 correntes de ramos. Para cada malha, tem-se um número definido de barras estáticas e a soma fasorial destas tensões estabelece as tensões de malha.

O circuito da figura 4.5 terá a seguinte equação matricial para sua resolução:

$$\begin{pmatrix} V1-V4 \\ V2-V9-V8 \\ V3-V6-V5+V2 \\ V4-V7 \\ V5-V8 \\ V6-V10-V9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z1+Z4 & 0 & 0 & -Z4 & 0 & 0 \\ 0 & Z2+Z9+Z8 & Z2 & 0 & Z8 & Z9 \\ 0 & Z2 & Z3+Z6+Z5+Z2 & 0 & -Z5 & -Z6 \\ -Z4 & 0 & 0 & Z4+Z7 & 0 & 0 \\ 0 & Z8 & -Z5 & 0 & Z5+Z8 & 0 \\ 0 & Z9 & -Z6 & 0 & 0 & Z6+Z10+Z9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I1 \\ I2 \\ I3 \\ I4 \\ I5 \\ I6 \end{pmatrix} \quad (42)$$

Os valores das tensões de malha, das impedâncias, correntes de malha e de ramo são mostrados na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Parâmetros do Circuito Equivalente – Enrolamento com Conexões Equipotenciais – Fase C

Tensão Malha [V]		Impedância Malha [ohm]		Corrente Malha [A]		Corrente de Ramo [A]	
V1	2135	Z1	30*Zb	I1	-4	i1	-4
V2	3938	Z2	60*Zb	I2	57	i2	-54
V3	2136	Z3	30*Zb	I3	-111	i3	-111
V4	2141	Z4	30*Zb	I4	26	i4	30
V5	1963	Z5	30*Zb	I5	-84	i5	27
V6	4226	Z6	60*Zb	I6	88	i6	199
V7	2131	Z7	30*Zb			i7	-26
V8	1963	Z8	30*Zb			i8	27
V9	1973	Z9	30*Zb			i9	-145
V10	2140	Z10	30*Zb			i10	-88

De posse de todas as correntes que efetivamente circulam pelas barras estatóricas, com o uso da equação da força magnetomotriz de reação de armadura, equação (27), calcula-se a campo magnético produzido por estas correntes.

O capítulo subsequente irá estabelecer a obtenção das densidades de fluxo magnético, ou indução magnética, no entreferro.

## 5 CAMPOS MAGNÉTICOS NO ENTREFERRO

A tensão induzida nos terminais de um gerador síncrono está diretamente relacionada com a magnitude e conteúdo harmônico da densidade de fluxo magnético no entreferro.

O campo magnético do entreferro é composto pelo campo magnético produzido pelos pólos do rotor e pelo campo magnético produzido pelas correntes que circulam nos enrolamentos do estator, o que chamamos de campo de reação de armadura.

### 5.1 CAMPO MAGNÉTICO DOS PÓLOS

As sapatas polares são as responsáveis pela modulação da forma de onda da distribuição de linhas de fluxo magnético, ou simplesmente pela forma do campo de excitação na região do entreferro.

Para obtenção da forma de onda da indução magnética produzida pelos pólos usar-se-á a “função trassínio”, definida por Rocha [8], que considera a sapata polar com raio único.

A indução magnética vista pelo estator é uma onda viajante em função do tempo e da posição, desta forma seguindo a formulação elaborada em [8] e considerando um instante de tempo fixo, tem-se para o intuito de nosso trabalho a equação mostrada em (43).

$$B_f(x) = B_0(x) \cdot \sum_k \left[ A_k \cdot \cos \left( k \cdot \frac{2 \cdot p}{D_\delta} \cdot x \right) \right] \quad k = 1, 3, 5, \dots \quad (43)$$

$A_k$  – amplitudes segundo [8] para descrever a indução magnética no entreferro;

$k$  – harmônicos de ordem ímpar;

$p$  – pares de pólos;

$x$  – deslocamento espacial [rad]

$B_{\theta}(x)$  – amplitude da indução função do entreferro e excentricidade, com  $\theta = x$  em (34)

A abordagem em [8] relaciona aproximações de uma função trapezoidal para a função de permeância do entreferro e uma função de onda retangular para a força magnetomotriz dos pólos. Equacionando com o auxílio de séries de Fourier, obtém valores de amplitude e de forma para a chamada “função trassínio”, resultando no gráfico da figura 5.1. A situação do gráfico é para máquina em vazio

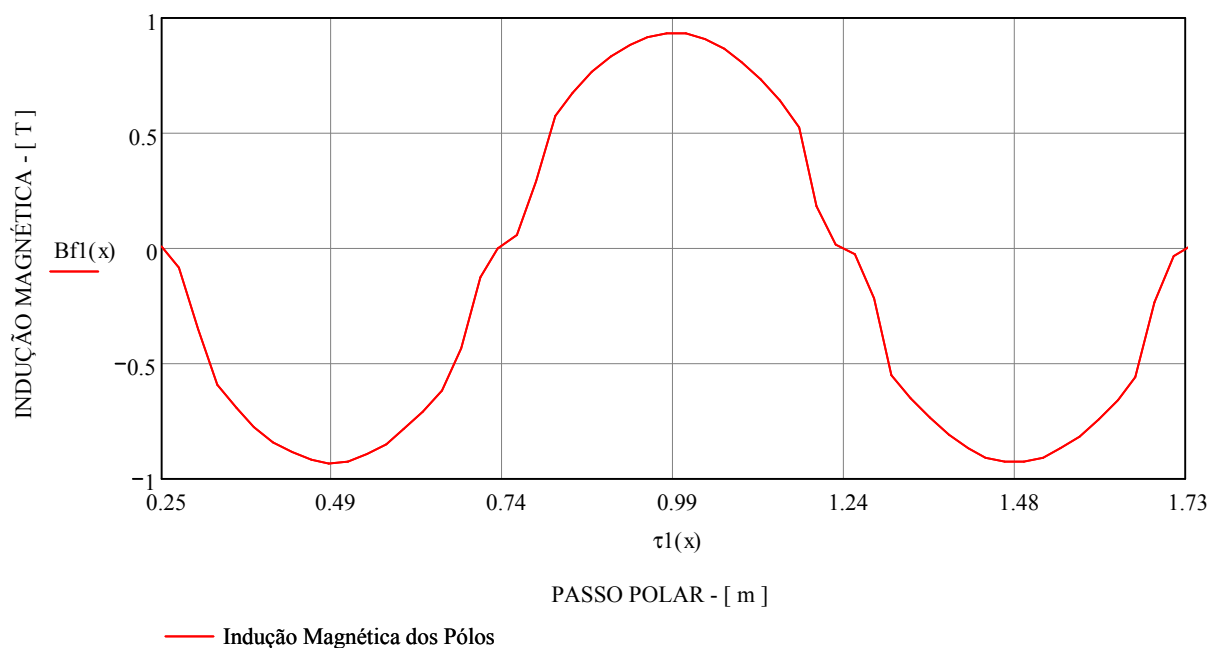


Figura 5.1 – Densidade de Fluxo Magnético dos Pólos – Gerador em Vazio

Para melhor visualizar e calcular os campos magnéticos no entreferro dividiu-se o gerador em seis partes iguais, ou seja, estudam-se os fenômenos a cada  $60^\circ$ . Esta divisão em seis partes é feita de forma proposital levando-se em conta o número de vezes que o enrolamento se repete. Esta repetição está vinculada aos fatores  $D_p$  e  $C_p$  do enrolamento. Lembrando que o gerador de ILS possui 540 ranhuras e 84 pólos, na equação (6) encontra-se  $D_p = 90$  ranhuras e  $C_p = 7$  pares de pólos, conforme mostrado na figura 5.2.

Desta maneira, calcula-se a indução dos pólos para cada intervalo. Como temos  $C_p$  pares de pólos por intervalo, com cada pólo tendo o passo polar  $\tau_p$ , os



intervalos terão  $2 \cdot C_p \cdot \tau_p$  cada. Note que este intervalo é igual ao período da harmônica fundamental da FMRA, como definido na seção 2.1.2.

Nestes intervalos, estando o rotor do gerador excêntrico em relação ao estator, varia-se o entreferro conforme a posição angular e faz com que se varie também a magnitude da indução magnética, como ilustrado no capítulo 3. Daí cada pólo terá seu valor de entreferro e magnitude de indução.

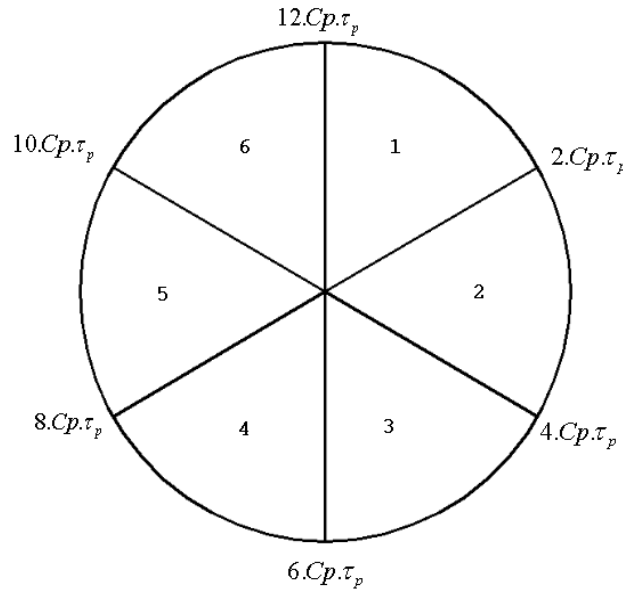


Figura 5.2 – Gerador dividido em 6 partes iguais, intervalos a cada  $2 \cdot C_p \cdot \tau_p$ ;  $D_p = 90$ ,  $C_p = 7$

Os gráficos da figura 5.3 mostram a variação do entreferro e da indução para cada intervalo. Considera-se uma excentricidade de 10%.

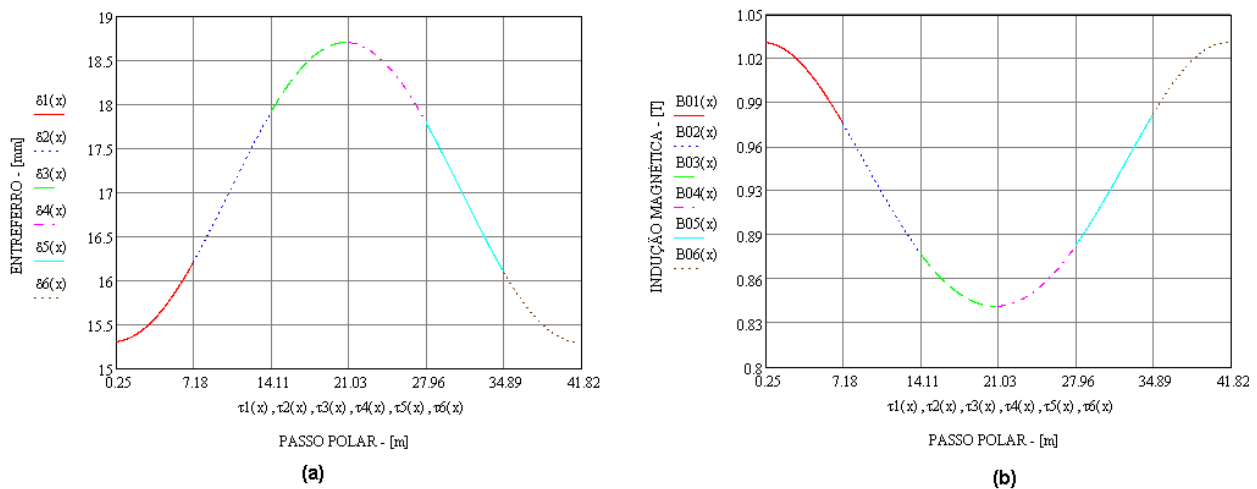


Figura 5.3 – (a) Entreferro Variável para cada Intervalo (b) Magnitude de Indução  $B_0$  para cada Intervalo

Devido a variação da magnitude da indução, o valor máximo de indução de cada pólo será diferente.

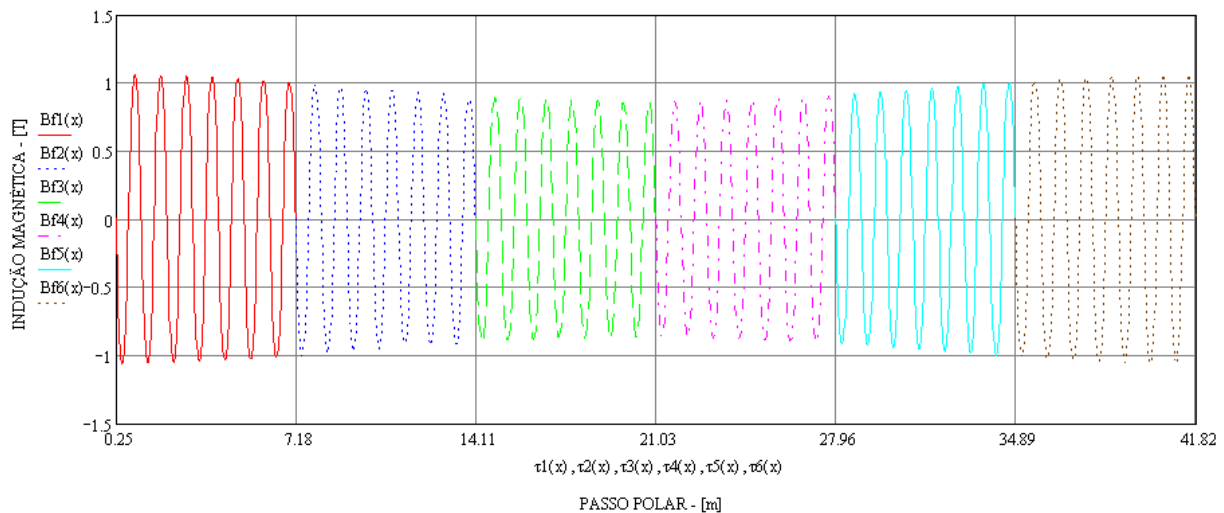


Figura 5.4 – Distribuição da Densidade de Fluxo Magnético no Entreferro devido aos Pólos com  $\varepsilon = 10\%$

A figura 5.4 mostra a distribuição de fluxo magnético ao redor de todo entreferro. É evidente uma maior indução na região de menor entreferro (intervalos 1 e 6) e um valor menor na região de maior entreferro (intervalos 3 e 4). Os intervalos 2 e 5 apresentam valores intermediários.

## 5.2 CAMPO MAGNÉTICO DE REAÇÃO DE ARMADURA

Estando a máquina em carga, circulará pelo enrolamento do estator corrente alternada para alimentar esta carga. Sobre a barra na qual está circulando esta corrente dentro da ranhura, como em qualquer condutor, surgirá um campo magnético ao redor. Este campo magnético dá origem no entreferro a uma distribuição de fluxo, é chamado reação da armadura.

Para o cálculo do campo magnético de reação de armadura utilizar-se-á a equação (13), onde se define a indução magnética  $B$  como o produto da permeância do entreferro  $\wp$  pela força magnetomotriz  $\mathfrak{F}$ , que para nosso caso é a de reação da armadura FMRA.

A FMRA foi apresentada em 2.1.2 e sua equação segue conforme (27). Para a obtenção da permeância específica na região do entreferro, basta dividir a equação

(43) por uma onda quadrada de período igual a dois passos polares e de amplitude correspondente da força magnetomotriz de excitação.

Esta operação conduz a (44), que se caracteriza por ser uma série de Fourier par.

$$\vartheta(x) = \vartheta_0(x) \cdot \left( PF_0 + \sum_{\nu} PF_{\nu} \cdot \cos\left(\nu \cdot \frac{\pi}{\tau_p} \cdot x\right) \right) \quad \nu = 1, 3, 5, \dots \quad (44)$$

Os fatores  $PF_0$  e  $PF_{\nu}$  são definidos por Rocha em [8] e para cada intervalo  $n$  teremos a permeância ideal  $\vartheta_0(x)$ .

$$\vartheta_{0n}(x) = \frac{\mu_0}{2 \cdot \delta_n(x)} \quad n = 1..6 \quad (45)$$

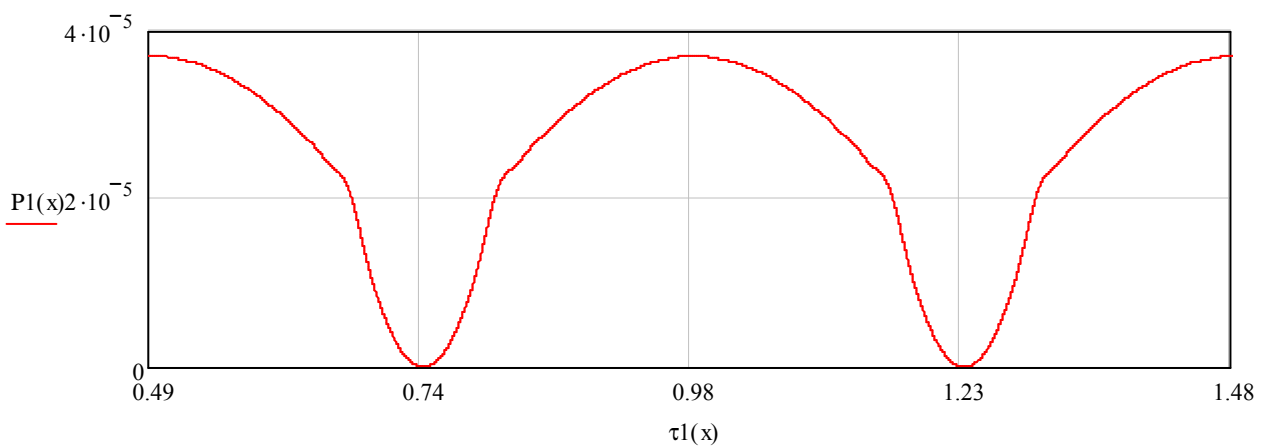


Figura 5.5 – Permeância Específica do Entferro

Efetuando o produto de (27) com (44), tem-se a forma de onda da densidade de fluxo magnético de reação de armadura no entferro, mostrada na figura 5.6.

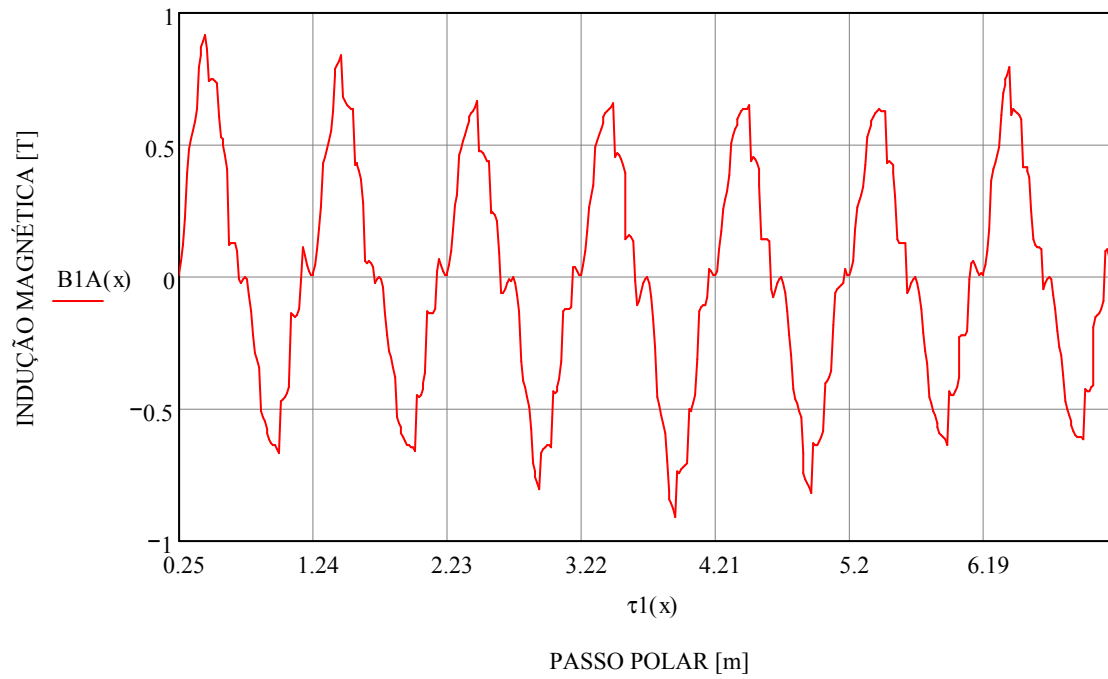


Figura 5.6 – Densidade de Fluxo Magnético de Reação da Armadura – gerador em carga

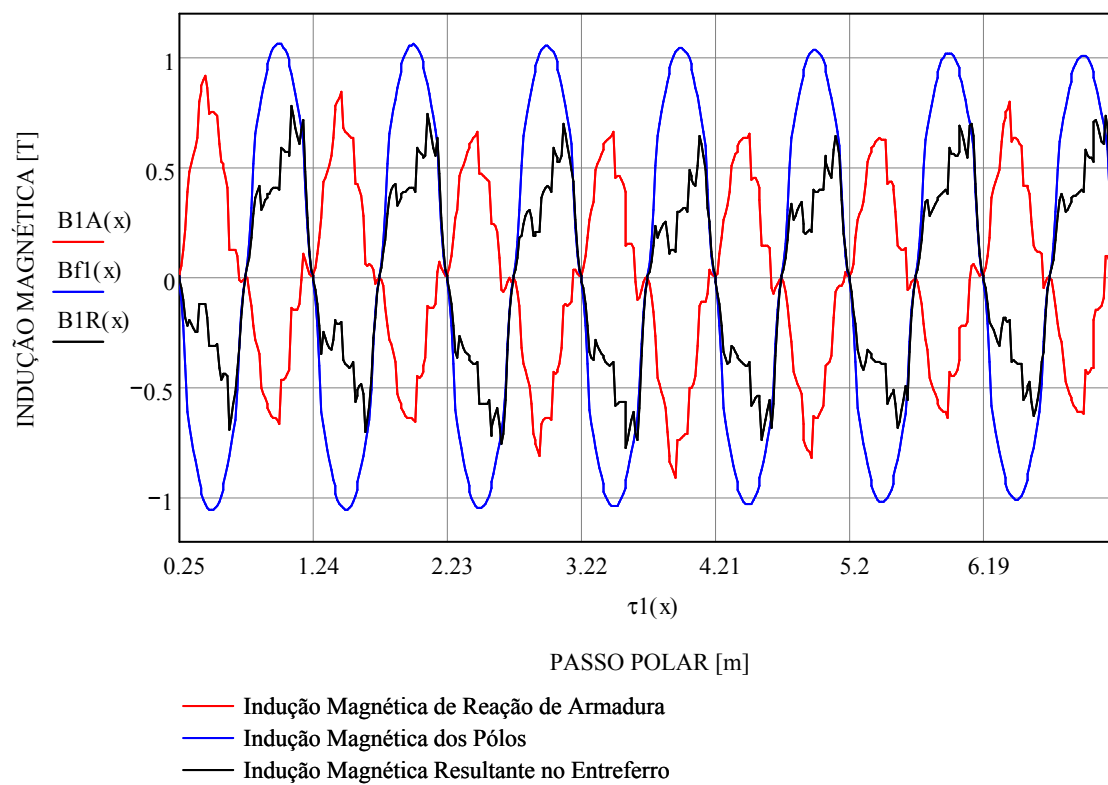


Figura 5.7 – Distribuição de Densidades de Fluxos Magnéticos – Excitação do Campo  $Bf1$ , Reação da Armadura  $B1A$  ( $I_{nom.}$ ) e Resultante  $B1R$  – gerador em carga

Verifica-se na figura 5.7 que a indução magnética oriunda da reação da armadura é defasada de  $180^\circ$  da indução magnética do campo de excitação do rotor. Assim, quando a máquina está em carga deve-se aumentar a corrente de excitação, já que o fenômeno de reação da armadura age no sentido de desmagnetizar o entreferro. Nas seções seguintes, com o gerador em vazio, será apresentado o efeito das correntes de circulação para a máquina excêntrica no campo de reação de armadura e seu impacto na indução resultante do entreferro. Serão vistos dois casos, o enrolamento originalmente construído, com três caminhos paralelos e com as correntes de circulação entre eles e o enrolamento com a adição das novas conexões equipotenciais.

### 5.2.1 Enrolamento Estático Original

Como explicado na seção 4.2 o gerador de Ilha Solteira possui três caminhos paralelos por fase e estando o rotor excêntrico em relação ao estator surgem entre os caminhos correntes de circulação.

A tabela 4.1 traz os valores dessas correntes em cada circuito das diferentes fases. Nota-se na tabela valores de correntes positivos e valores negativos. Os sinais das correntes, ou seja, o sentido que elas circulam em cada circuito é definido pelos valores de tensão em cada ramo. Como há um desequilíbrio de distribuição de densidade de fluxo no entreferro, figura 5.4, há um rearranjo das correntes de forma que se estabelece novamente um equilíbrio, mesmo com o gerador excêntrico.

Desta forma, onde há induções altas do campo de excitação, a reação de armadura irá atenuar estas magnitudes, permanecendo as correntes de circulação com sinal positivo e mantendo a reação de armadura contrária à indução dos pólos, como mostrado na figura 5.8.

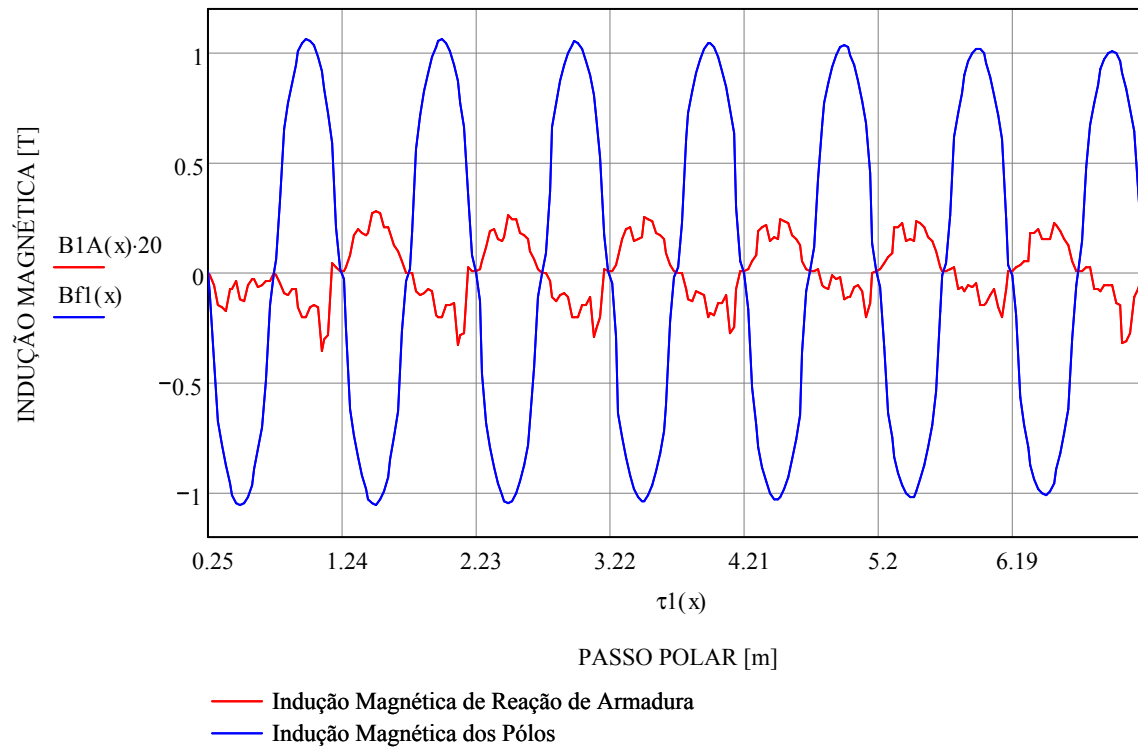


Figura 5.8 – Indução dos Pólos e Reação da Armadura ( $\times 20$ ) – intervalo 1, circulação com sinal positivo

Por outro lado, onde há baixos valores de indução do campo de excitação, a reação de armadura irá ao sentido de aumentar estas magnitudes. Para tanto é necessário que a indução de reação de armadura se some à indução dos pólos e para isto as correntes se invertam, estando agora a reação de armadura em fase com o campo de excitação, como mostrado na figura 5.9.

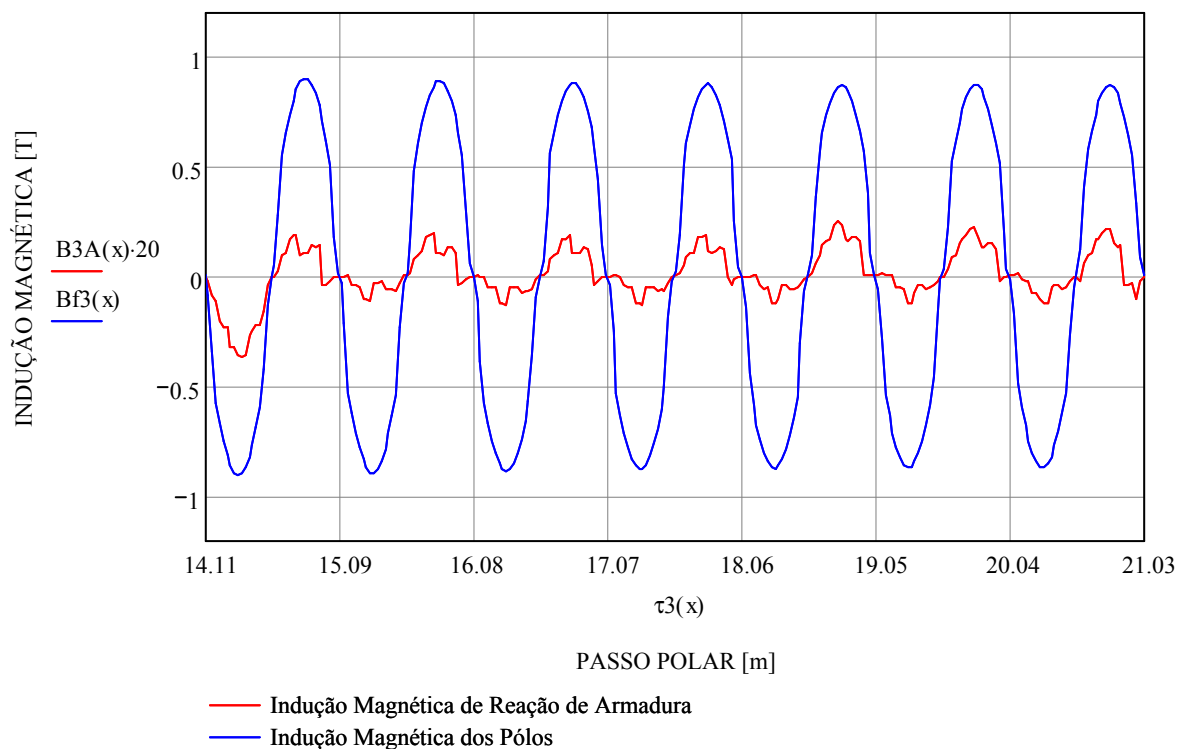


Figura 5.9 – Indução dos Pólos e Reação da Armadura ( $\times 20$ ) – intervalo 3 - circulação com sinal negativo

A composição das densidades de fluxo magnéticos originados nos pólos e pela reação da armadura resulta na indução resultante no entreferro. Assim, para cada um dos seis intervalos haverá uma distribuição de fluxo resultante mais uniforme. Onde anteriormente a indução era alta ela se reduzirá, e onde era menor aumentará.

### 5.2.2 Enrolamento Estático com Conexões Equipotenciais

A adição das conexões equipotenciais tem por objetivo aumentar a circulação de corrente, criando “novos caminhos paralelos” para sua circulação. Isto faz com que a distribuição de fluxo magnético no entreferro do gerador seja mais uniforme do que anteriormente.

A escolha dos pontos de conexão foi abordada no capítulo 2, calculando-se os vetores de tensão de cada barra. Para cada fase uma disposição foi definida e as correntes que circulam entre as novas malhas calculadas segundo o capítulo 4.

Apresenta-se nas figuras 5.10 e 5.12 uma comparação da densidade de fluxo de reação de armadura antes da adição das conexões equipotenciais, conforme abordado na seção anterior, e a densidade de fluxo devido as correntes que passam a

circulam entre os novos caminhos paralelos. Novamente os intervalos apresentados são os intervalos 1, com maiores níveis de indução, e o intervalo 3, com menores.

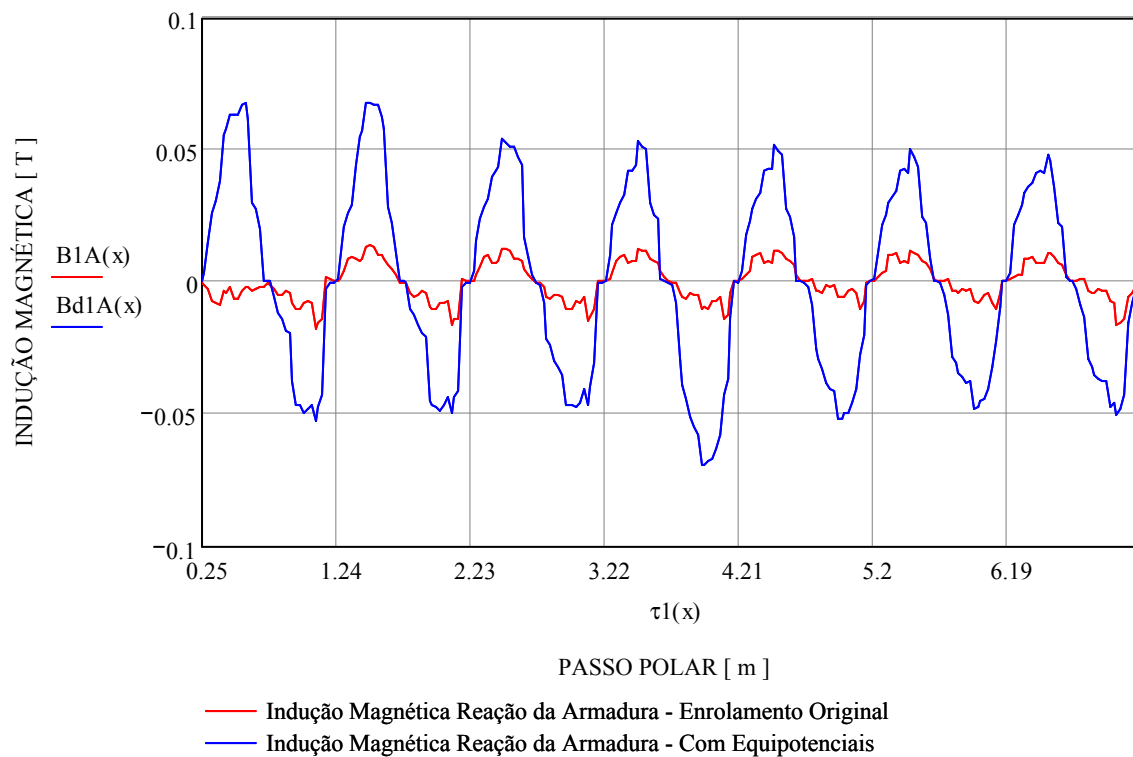


Figura 5.10 – Reação Armadura antes ( $B1A$ ) e depois ( $Bd1A$ ) das Conexões Equipotenciais – intervalo 1

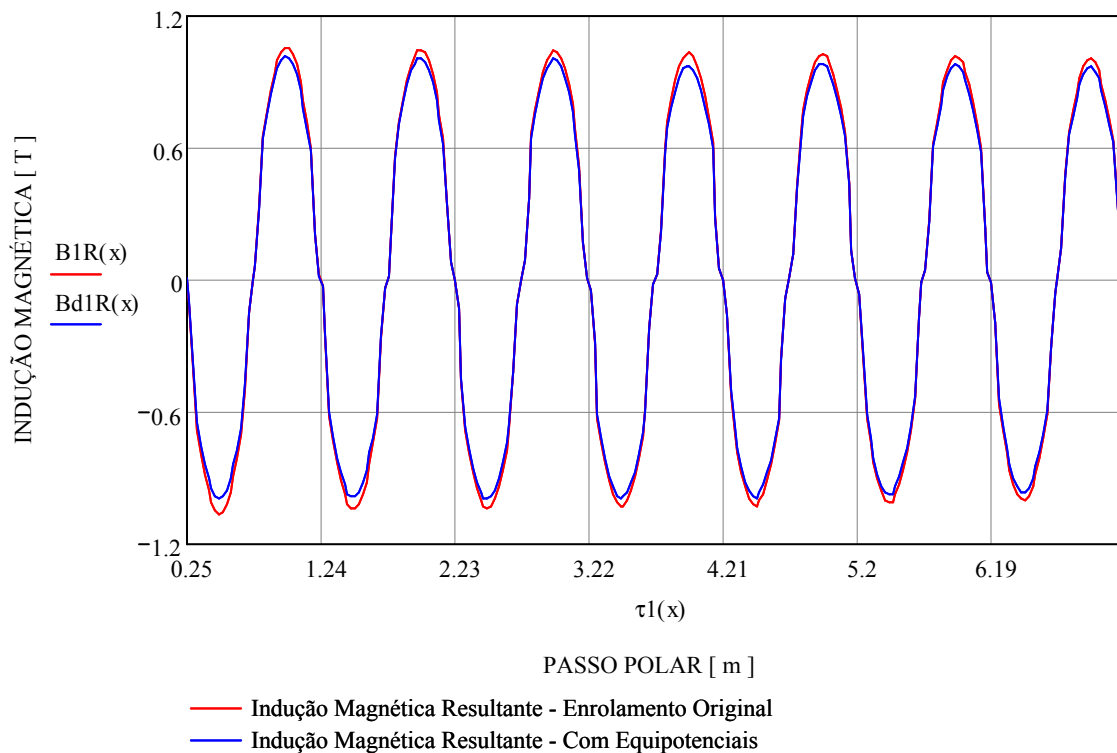


Figura 5.11 – Resultante antes ( $B1R$ ) e depois ( $Bd1R$ ) das Conexões Equipotenciais – intervalo 1



Como pode ser visto na figura 5.11 a indução magnética resultante depois da adição das conexões equipotenciais diminui no intervalo 1.

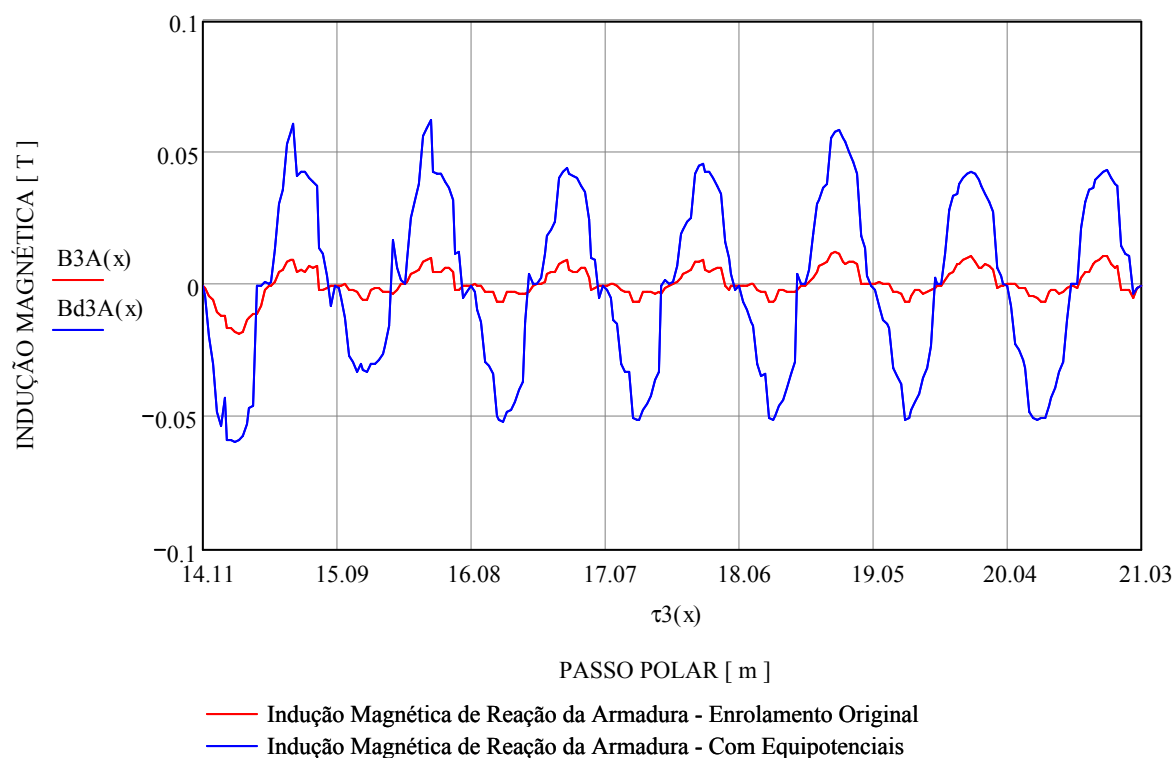


Figura 5.12 – Reação Armadura antes ( $B3A$ ) e depois ( $Bd3A$ ) das conexões equipotenciais – intervalo 3

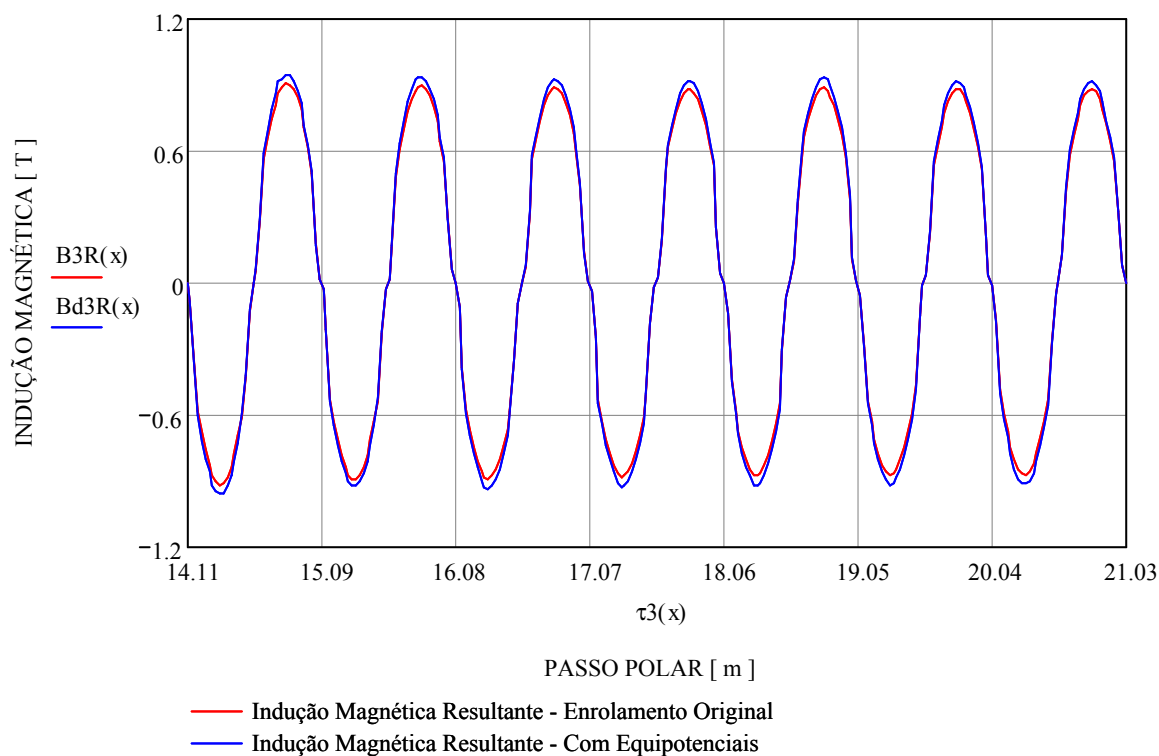


Figura 5.13 – Resultante antes ( $B3R$ ) e depois ( $Bd3R$ ) das Conexões Equipotenciais – intervalo 3

Na figura 5.13 a indução magnética resultante aumenta com a adição das conexões equipotenciais no intervalo 3.

O impacto das correntes que circulam entre os novos caminhos na indução magnética resultante no entreferro é de grande importância para o cálculo das forças de atração magnéticas entre o estator e rotor, como será visto no capítulo seguinte.

## 6 “EMPUXO MAGNÉTICO” DESBALANCEADO

O “Empuxo Magnético” Desbalanceado (UMP) resulta do desbalanceamento das forças de atração magnética entre os pólos do rotor e o núcleo do estator devido à variação do entreferro. A resultante destas forças possui uma amplitude e uma direção, normalmente à frente do menor entreferro.

Estas forças de atração magnéticas são definidas pelo Tensor de Maxwell [11], sendo diretamente proporcionais à indução resultante no entreferro.

$$F(x) = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot B(x)^2 \cdot Ap \quad (46)$$

onde

$B(x)$  – indução magnética resultante no entreferro [T]

$Ap$  – seção superficial do pólo [m<sup>2</sup>]

Cada um dos 6 intervalos possui  $C_p$  pares de pólos, ou seja, 7 pares de pólos. Sobre estes pólos existe uma distribuição de densidade de fluxo resultante da interação da indução originada pelos pólos e da reação da armadura, conforme já descrito. Assim a força sobre cada pólo está diretamente ligada aos valores de indução à frente deste pólo.

As figuras 6.1 e 6.2 mostram as forças de atração de cada pólo para o intervalo 1 e para o intervalo 3, na condição do enrolamento original.

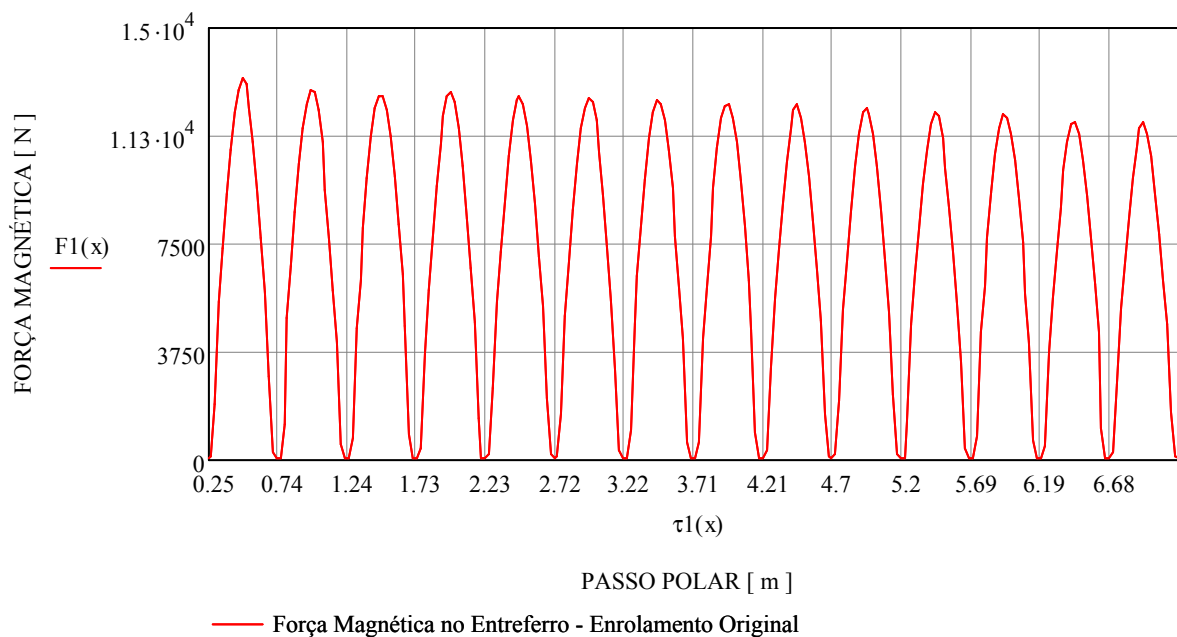


Figura 6.1 – Força Magnética nos Pólos do Intervalo 1

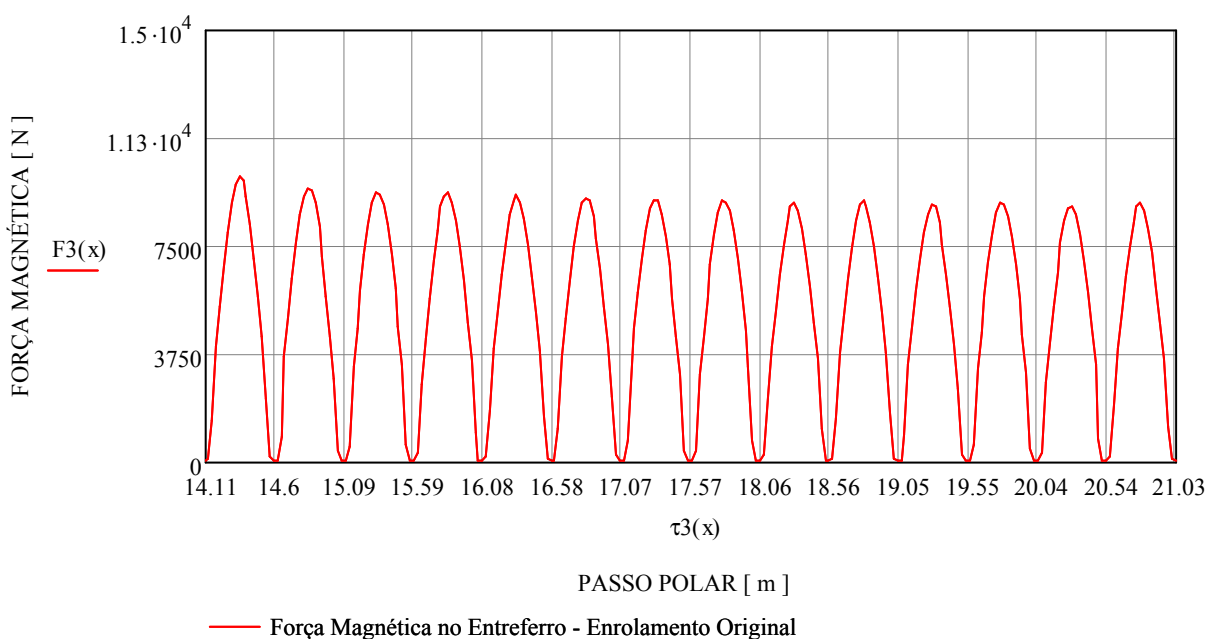


Figura 6.2 – Força Magnética nos Pólos do Intervalo 3

Verifica-se a diferença de amplitude em relação as forças dos pólos para cada intervalo. No intervalo 1, onde há um menor entreferro, as forças são maiores, enquanto que no intervalo 3, com maior entreferro, as forças são menores.

Fazendo-se a soma vetorial das forças em cada intervalo, obtém-se a força resultante por intervalo e somando novamente estas resultantes, obtém-se o “Empuxo

Magnético” Desbalanceado, com seu módulo e ângulo para a condição do enrolamento original.

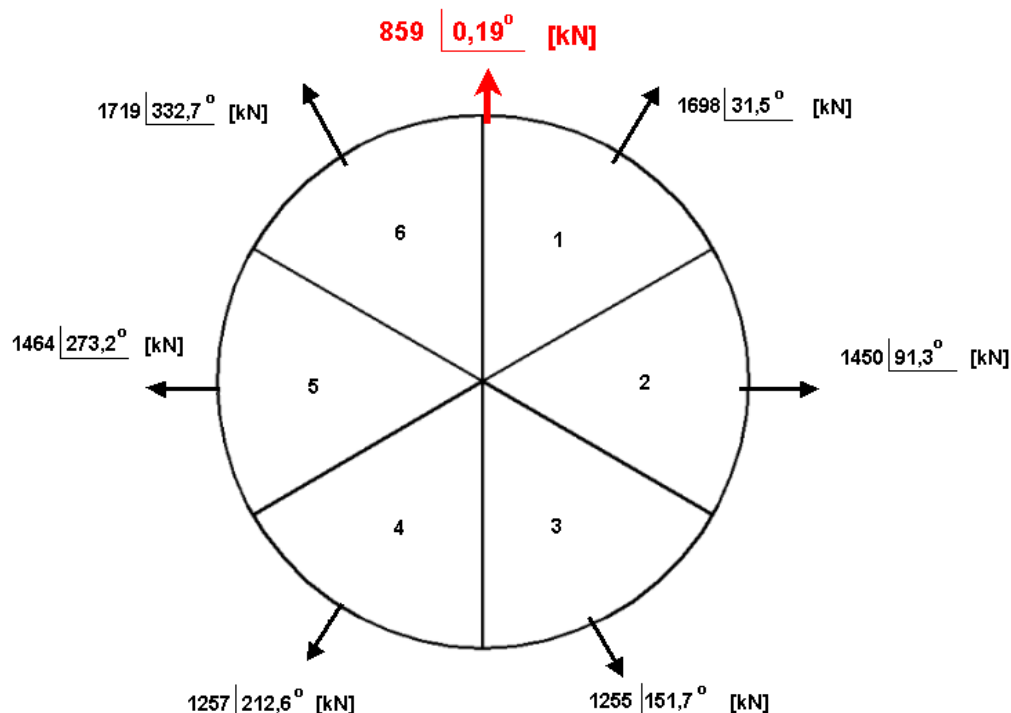


Figura 6.3 – Forças em cada Intervalo e UMP Resultante – enrolamento original

Como a força de atração magnética entre estator e rotor é diretamente proporcional ao quadrado da indução, a diminuição da indução resultante com a inserção das conexões equipotenciais no intervalo 1 terá maior impacto na magnitude da força. Esta será menor quando comparada com a situação antes da inserção de tais conexões. Em contrapartida, no intervalo 3, haverá um aumento da força nesta região devido ao maior valor da indução magnética.

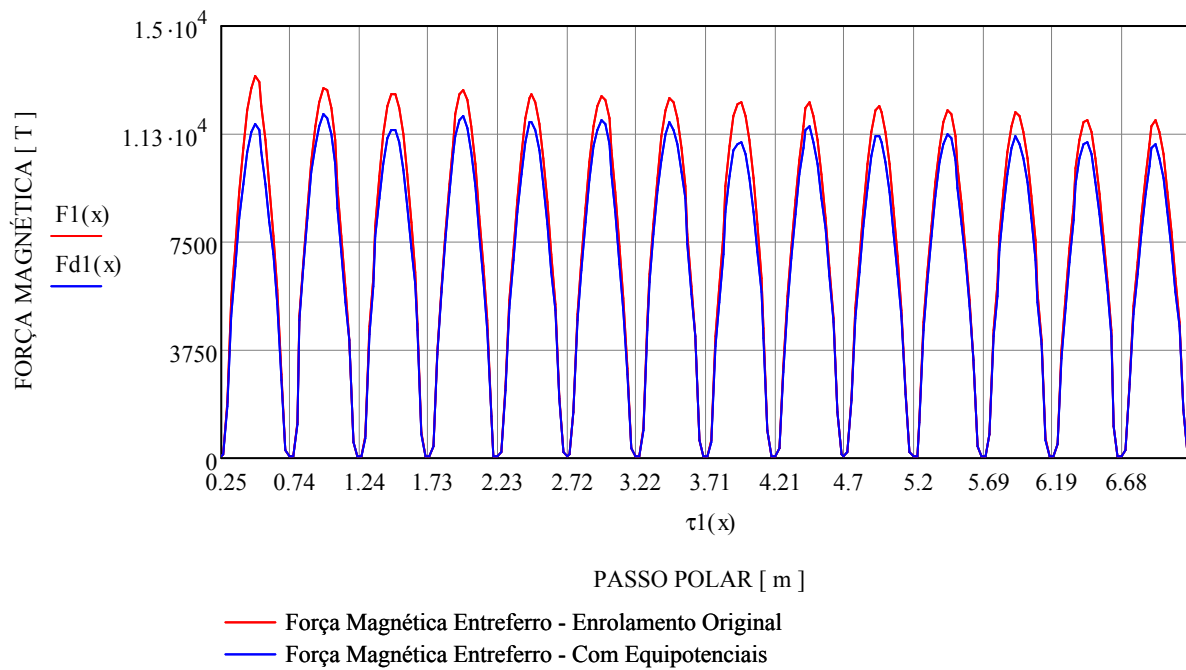


Figura 6.4 – Força antes (F) e depois (Fd1) das equipotenciais – intervalo 1 – diminuição das forças

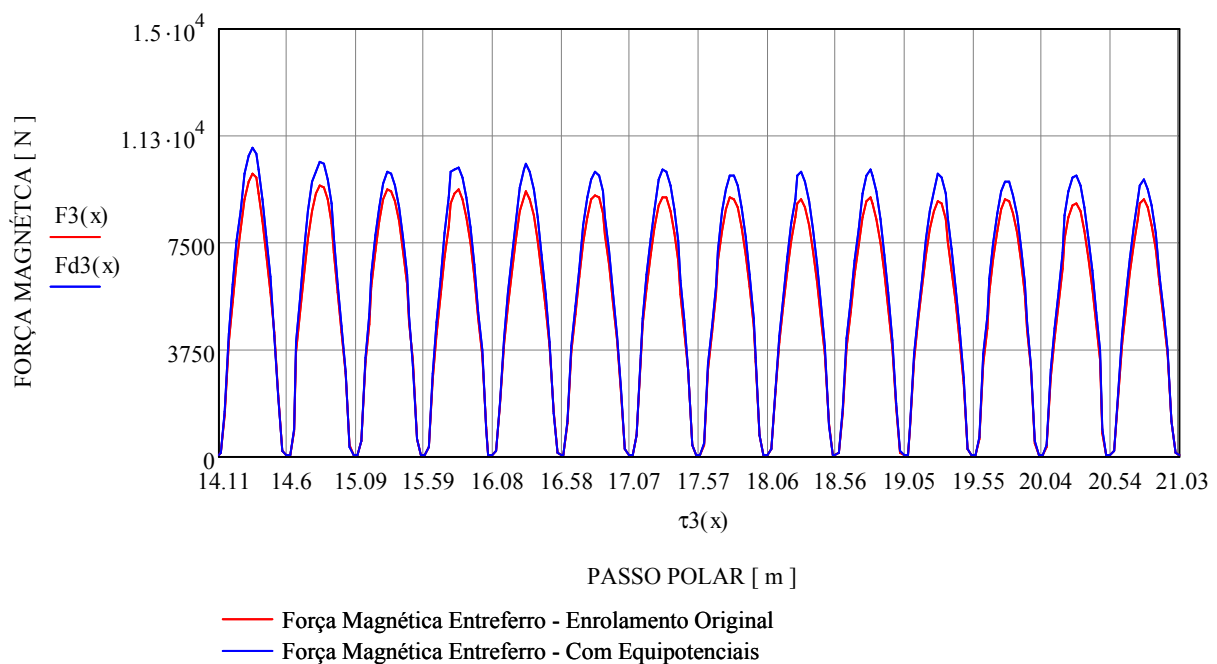


Figura 6.5 – Forças antes (F3) e depois (Fd3) das equipotenciais – intervalo 3 – aumento das forças

O efeito em toda máquina é de se reduzir as forças onde anteriormente eram grandes e aumentar onde eram menores, equilibrando a distribuição destas forças no entreferro, e mitigando assim o UMP.

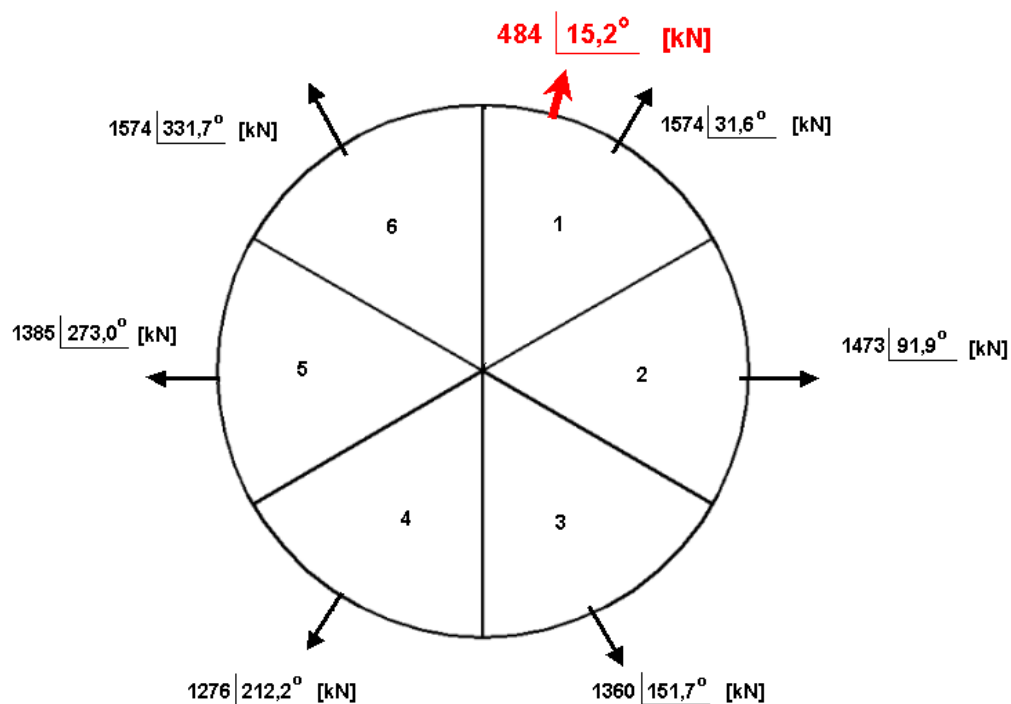


Figura 6.6 – Forças em cada Intervalo e UMP Resultante – Enrolamento com Conexões Equipotenciais

O resultado no UMP é uma diminuição de 859 kN para 484 kN, sendo a direção deste empuxo deslocado 15°, o que representa **redução de 43,6 %**. Esta redução irá contribuir diretamente nos valores de oscilação encontrados atualmente no gerador de Ilha Solteira.

A tabela seguinte traz um resumo dos valores encontrados para cada intervalo e do UMP resultante.

Tabela 6.1 – Força Magnética por Intervalo e UMP Resultante

		Enrolamento original	Enrolamento c/ equipotenciais
<b>Intervalo 1</b>	Força [kN]	1698	1574
	Ângulo [o]	31,5	31,6
<b>Intervalo 2</b>	Força [kN]	1450	1473
	Ângulo [o]	91,3	91,9
<b>Intervalo 3</b>	Força [kN]	1255	1360
	Ângulo [o]	151,7	151,7
<b>Intervalo 4</b>	Força [kN]	1257	1286
	Ângulo [o]	212,6	212,2
<b>Intervalo 5</b>	Força [kN]	1464	1385
	Ângulo [o]	273,2	273,0
<b>Intervalo 6</b>	Força [kN]	1719	1574
	Ângulo [o]	332,7	331,7
<b>UMP</b>	Força [kN]	<b>859</b>	<b>484</b>
	Ângulo [o]	<b>0,19</b>	<b>15,2</b>

Verificou-se neste capítulo a efetiva mitigação do empuxo magnético com a inserção de conexões equipotenciais entre os caminhos paralelos da mesma fase.

No próximo capítulo são apresentadas para o mesmo gerador alternativas de enrolamento: enrolamento ondulado com as fases com distribuição diferente e enrolamento do tipo imbricado. Calcula-se ainda o UMP sem considerar correntes de circulação, que é o resultado apresentado normalmente pelos fabricantes de máquinas elétricas girantes, baseado nas formulações da bibliografia existente sobre o assunto.



## 7 ESTUDO DE CASOS

O efeito das correntes de circulação nas barras estatóricas, responsável pela distribuição de fluxo magnético de reação da armadura, em muito contribui para alterar os valores de indução resultante no entreferro e, por conseguinte o valor das forças magnéticas entre estator e rotor.

Desta forma, a distribuição das barras e como elas estão interligadas influem significativamente nos valores de densidade de fluxo de reação da armadura. Neste capítulo se apresentam alguns tipos de conexões entre as barras.

### 7.1 UMP - SEM REAÇÃO DA ARMADURA

Este caso simula o gerador sem correntes de circulação, ou seja, somente a indução magnética dos pólos é responsável pela indução resultante no entreferro. É bom lembrar que estamos sempre tratando da máquina em vazio e o resultado para este caso deverá ser similar aos resultados calculados pelas formulações encontradas nas bibliografias e que normalmente é utilizado pelos fabricantes de máquinas para projeto.

A distribuição de densidade de fluxo magnético utilizada será conforme apresentado na figura 5.4, mantendo a excentricidade de 10 %. As figuras 7.1 e 7.2 mostram as forças por pólos para os intervalos 1 e 3.

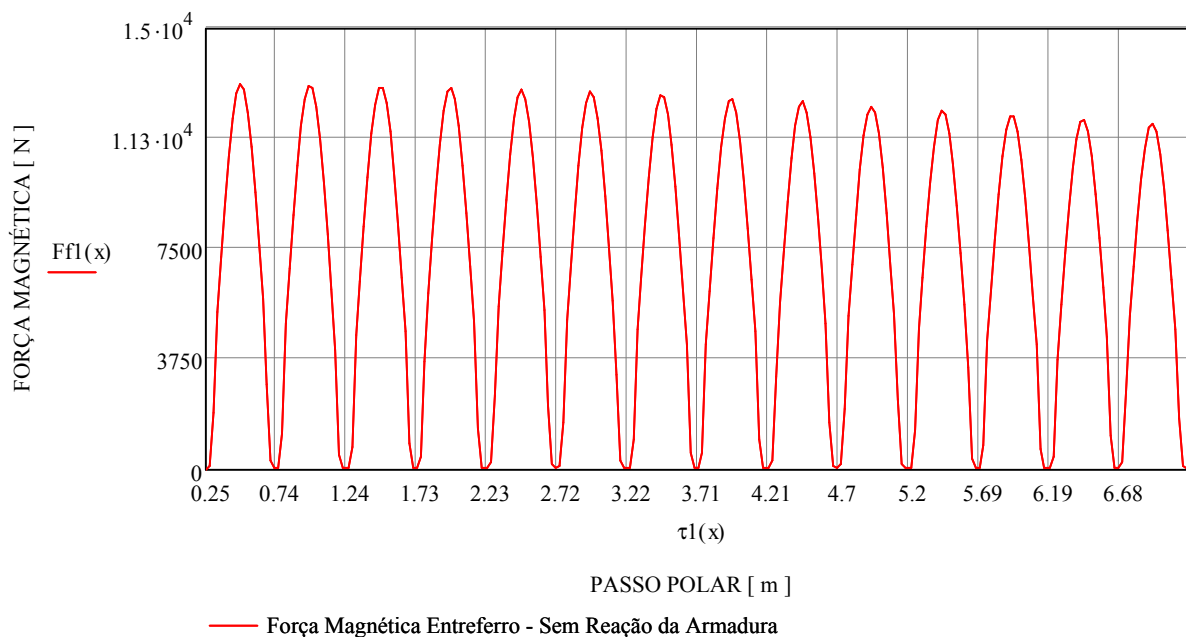


Figura 7.1 – Forças Magnéticas para os Pólos do Intervalo 1 – sem correntes de circulação

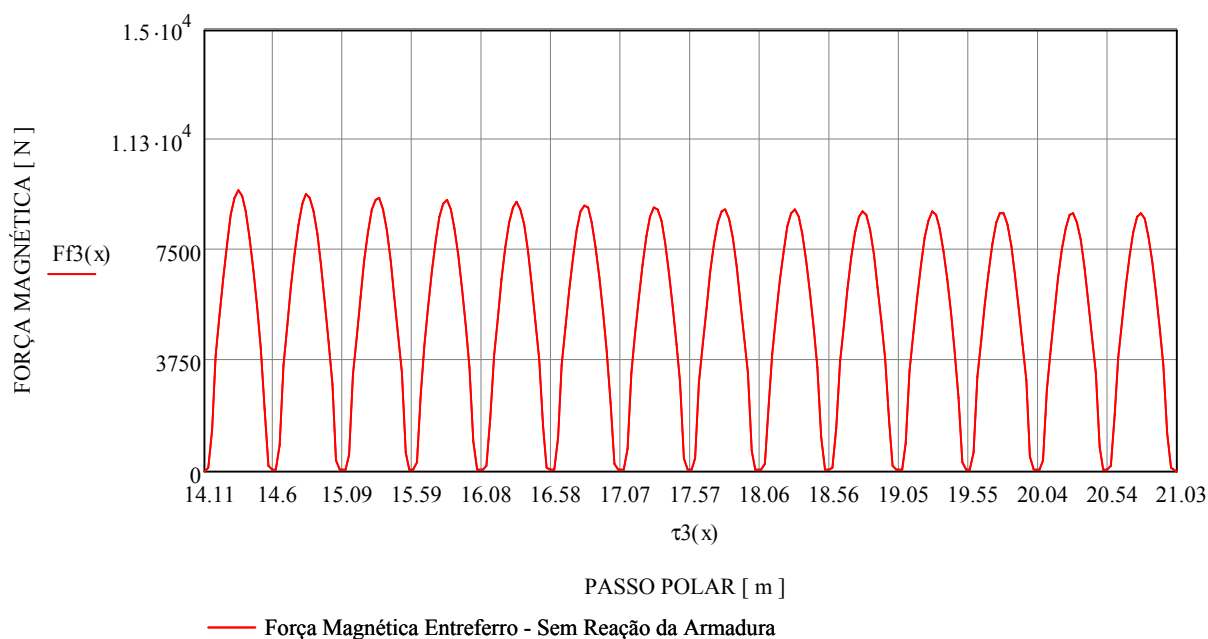


Figura 7.2 – Forças Magnéticas para os Pólos do Intervalo 3 – sem correntes de circulação

As forças no intervalo 1 mantém sua amplitude maior que no intervalo 3 por conta do menor entreferro a frente deste intervalo e da maior indução magnética dos pólos.

Fazendo a soma vetorial de todos os intervalos encontra-se como resultado um **UMP de 952 kN, em 16,98°**.

Comparando este valor com o calculado através do programa de projeto de máquinas síncronas da Alstom (1043 kN,  $\varepsilon = 10\%$ ) e através de rotina de cálculo com base nas formulações de Rosenberg [1] (1020 kN,  $\varepsilon = 10\%$ ) obtém-se um resultado satisfatório, dentro de tolerâncias de engenharia.

O valor encontrado de 952 kN quando comparado com o valor considerando as correntes de circulação entre os caminhos paralelo, porém sem conexões equipotenciais (859 kN) é somente 10,8 % superior.

Deve-se isto ao fato que a distribuição do enrolamento ondulado como originalmente concebido não favorece que as correntes de circulação de cada ramo atuem isoladamente, tendo uma sobreposição de efeitos que reduz as suas influências.

Esta sobreposição pode ser verificada no gráfico da figura 7.3, que mostra a distribuição das barras de uma fase em seus circuitos paralelos em função de toda a circunferência do estator, através da tensão induzida em cada barra, com  $\varepsilon = 10\%$ .

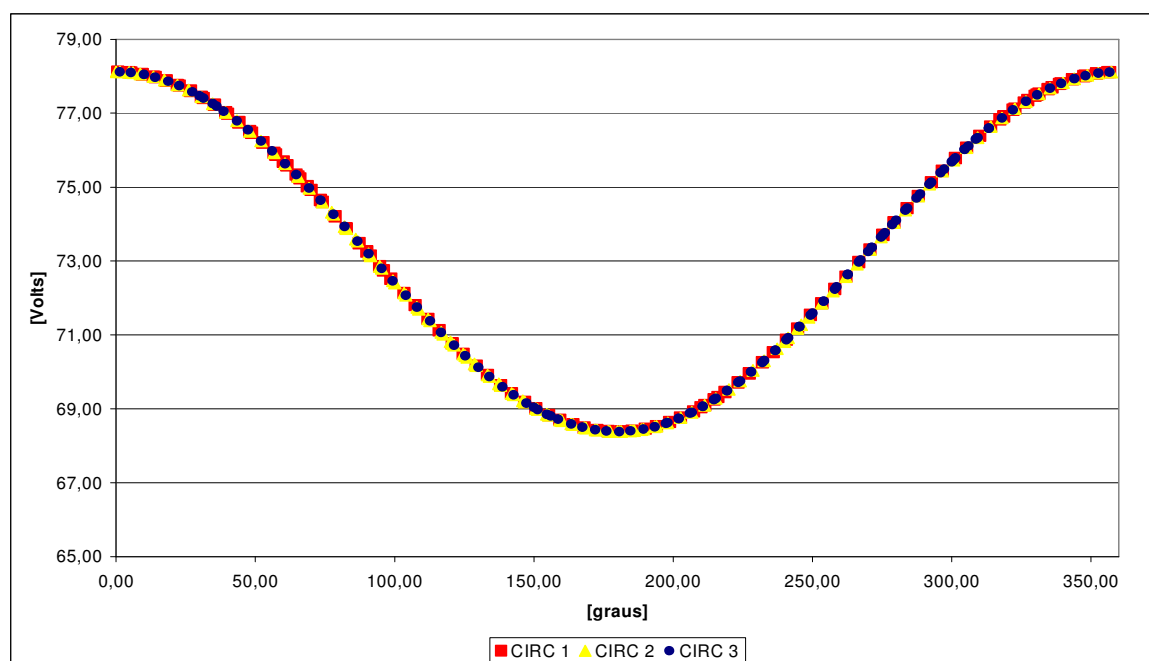


Figura 7.3 – Tensões Induzidas nos Circuitos Paralelos da Fase A – enrolamento ondulado original

No enrolamento ondulado original cada circuito paralelo das fases percorre toda a circunferência do estator e os circuitos se sobrepõem. Com isso há uma interação indesejável entre as correntes de circulação, reduzindo o efeito dos campos magnéticos produzidos por elas.

## 7.2 UMP - ENROLAMENTO ONDULADO MODIFICADO

Faz-se agora uma distribuição das bobinas do enrolamento de forma diferente, mantendo o esquema de enrolamento do tipo ondulado. Procura-se distribuir as barras por caminhos paralelos separadamente para que o efeito do campo magnético produzido pelas correntes de circulação seja mais significativo.

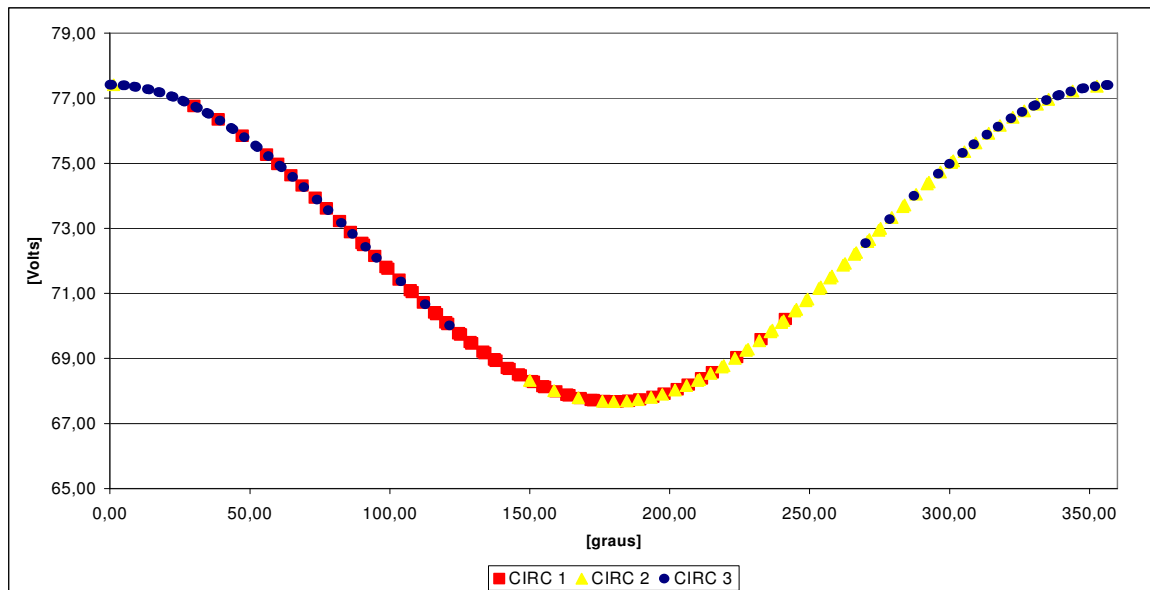


Figura 7.4 – Tensões Induzidas nos Circuitos Paralelos da Fase A – enrolamento ondulado modificado

O resultado nas forças dos pólos dos intervalos 1 e 3 e a indução magnética resultante são mostrado nos gráficos das figuras 7.5 e 7.6.

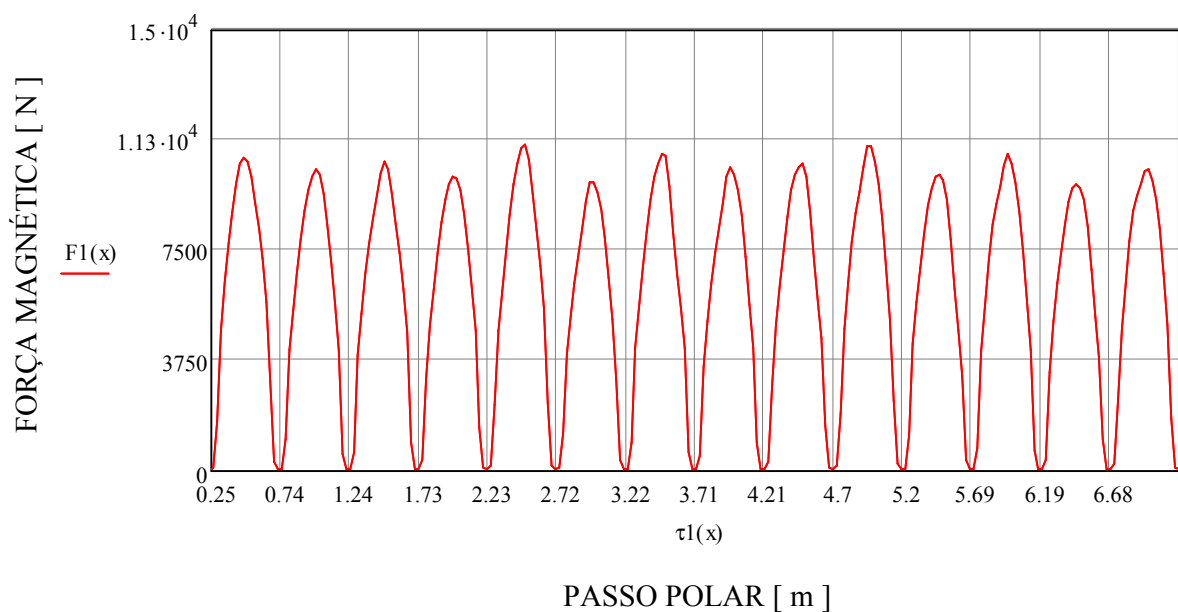


Figura 7.5 – Forças Magnéticas para os Pólos do Intervalo 1 – Enrolamento Ondulado Modificado

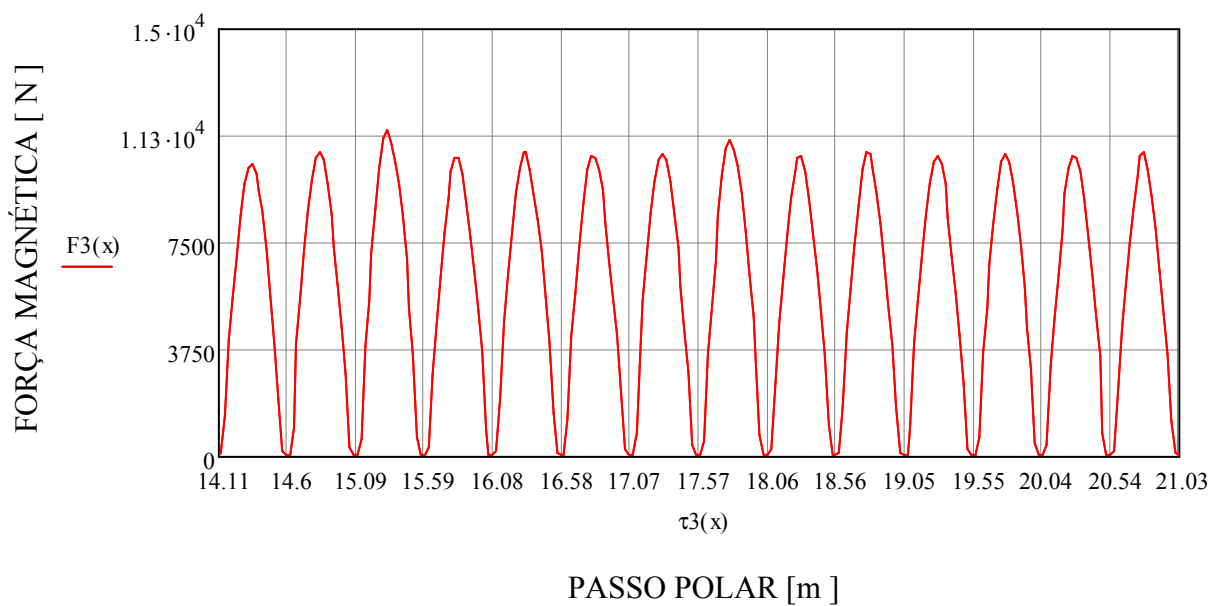


Figura 7.6 – Forças Magnéticas para os Pólos do Intervalo 3 – Enrolamento Ondulado Modificado

Comparando as forças obtidas com o enrolamento ondulado original (figuras 6.1 e 6.2) e as forças obtidas com o enrolamento ondulado modificado (figuras 7.5 e 7.6) verifica-se maior uniformidade nas amplitudes das forças para o segundo caso. Isto

resultada de uma maior uniformidade nas densidades de fluxo magnético no entreferro.

Fazendo a soma vetorial de todos os intervalos encontra-se como resultado um **UMP de 182 kN, em 335,4°**, sendo 4,7 vezes inferior, demonstrando a importância da distribuição e tipo de conexões do enrolamento estatórico.

### 7.3 UMP - ENROLAMENTO IMBRICADO

No enrolamento do tipo imbricado consegue-se uma melhor distribuição dos caminhos paralelos, ficando cada um dos 3 caminhos paralelos ao redor de 1/3 do gerador. Isto faz com que não haja sobreposição de campos magnéticos devido as correntes de circulação entre os caminhos paralelos.

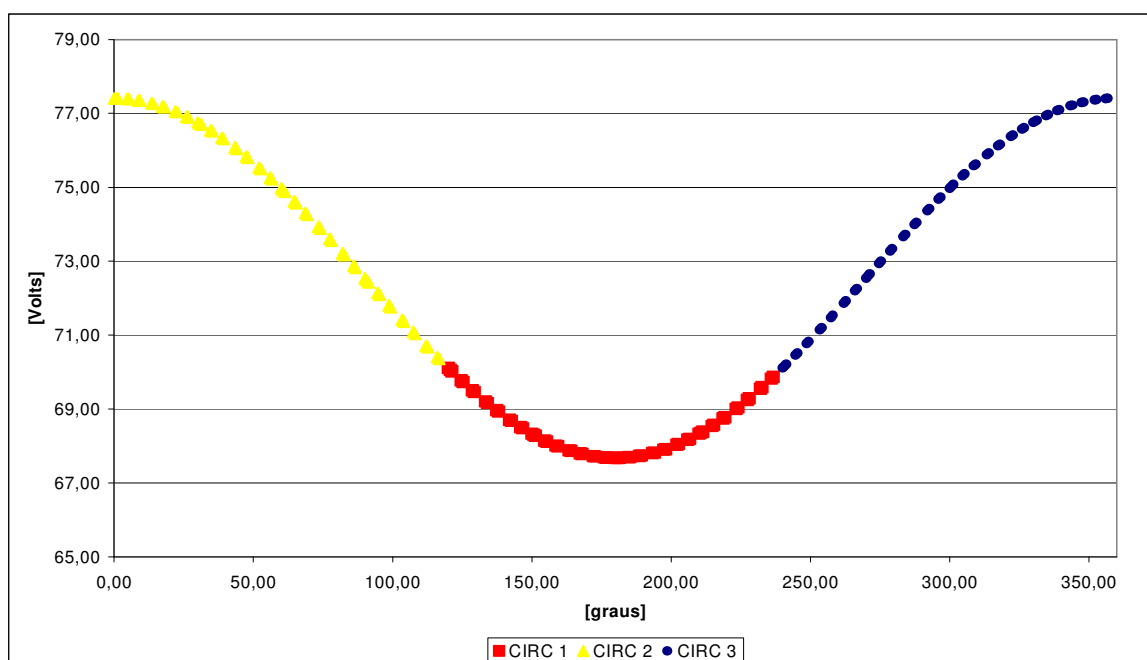


Figura 7.7 – Tensões Induzidas nos Circuitos Paralelos da Fase A – enrolamento imbricado

No gráfico da figura 7.7 o circuito paralelo 1 possui a menor tensão induzida em suas barras, ou seja, ele está a frente do maior entreferro. Desta forma, como as correntes fluem do maior para o menor potencial, na região do circuito 1 haverá mais corrente de circulação e no sentido contrário. Isto faz com que, além do aumento da indução de reação de armadura, esta esteja em fase com a indução devido aos pólos,

aumentando significativamente a indução resultante nesta região, onde anteriormente era pequena.

Nas regiões dos circuitos paralelos 2 e 3 o efeito dos campos magnéticos oriundos das correntes de circulação agem sozinhos nestas regiões, como também na região do circuito 1, fazendo com que haja um melhor equilíbrio nas densidades de fluxo magnético à frente de cada pólo, resultando em uma distribuição de forças equilibradas ao redor da circunferência do rotor, sendo a redução do UMP mais significativa.

A figura 7.8 mostra a força magnética nos pólos do intervalo 1 para o enrolamento imbricado.

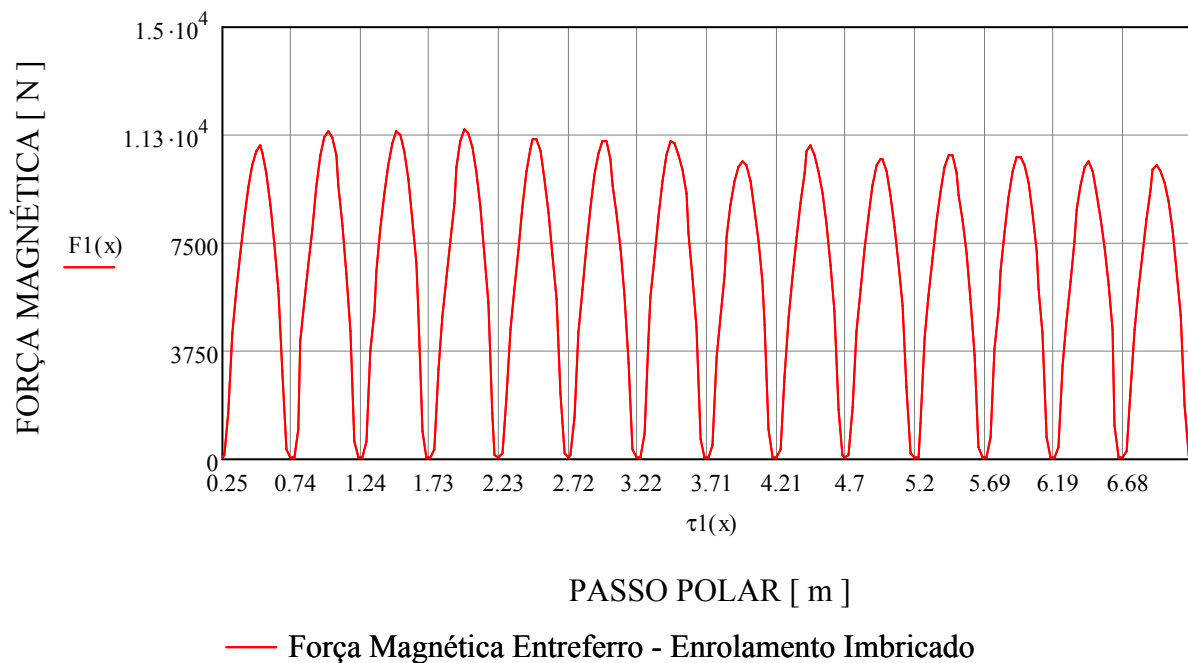


Figura 7.8 – Forças Magnéticas para os Pólos do Intervalo 1 – Enrolamento Imbricado

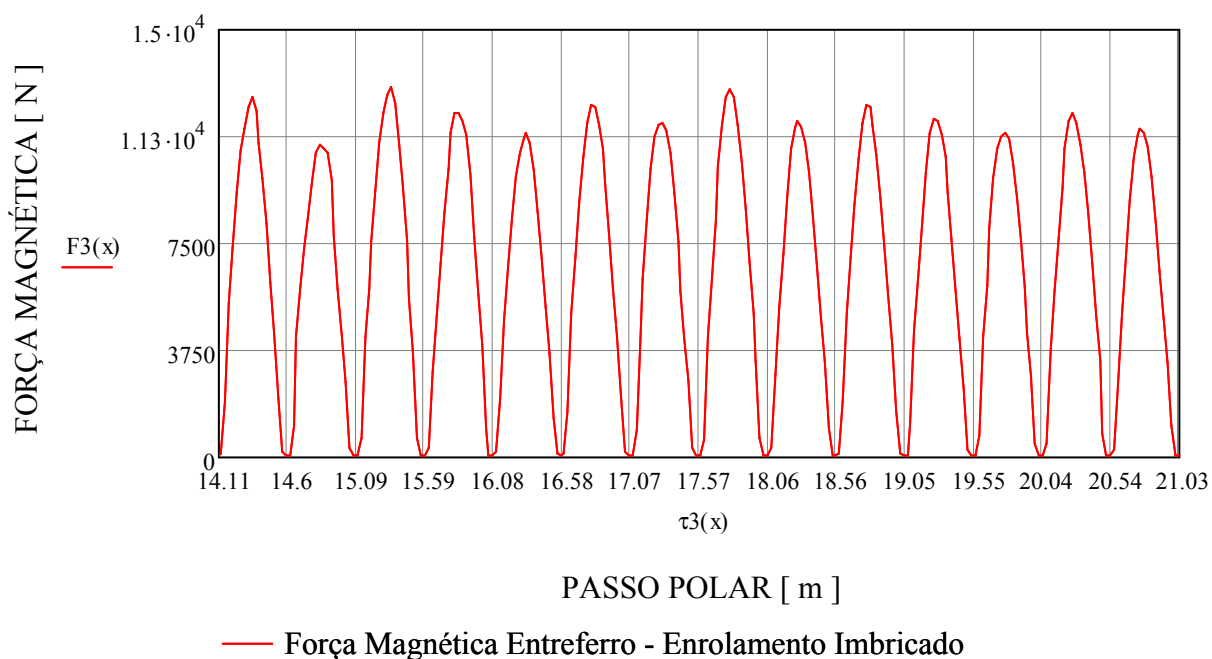


Figura 7.9 – Forças Magnéticas para os Pólos do Intervalo 3 – Enrolamento Imbricado

Fazendo a soma vetorial de todos os intervalos encontra-se como resultado um **UMP de 127 kN, em 192,6°**.

Neste caso, as componentes de força nos intervalos 3 e 4 são muito significativas. Comparando as forças mostradas na figura 7.9 com as forças do mesmo intervalo 3 para as outras ligações do enrolamento (figuras 7.2 e 7.6), nota-se que há um aumento das forças neste intervalo. Com isto o UMP chega a inverter seu sentido, estando agora a frente do maior entreferro em 192,6°.



## 8 CONCLUSÕES

O trabalho tem como intuito mostrar a mitigação do Empuxo Magnético Desbalanceado com a adição de conexões equipotenciais, sendo aplicado de forma prática a um gerador da usina hidrelétrica de Ilha Solteira, fruto de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento em parceria com a Companhia Energética de São Paulo – Cesp e a ALSTOM Power Systems Hydro. O intuito é minimizar os níveis de oscilação do rotor que, em ensaios realizados em janeiro de 2008, atingiram 600  $\mu\text{m}$ .

Uma análise dos vetores de tensão do enrolamento estatórico foi realizada no capítulo 2, definindo-se então os pontos de conexões equipotenciais. Ainda neste capítulo introduziu-se o cálculo da força magnetomotriz de reação da armadura através de uma série de Fourier.

A importância da formulação da FMRA em uma equação que relaciona a corrente em cada barra ao longo do estator é a chave para se calcular o efeito da distribuição de densidade de fluxo de reação de armadura.

A excentricidade estática foi abordada com o objetivo de mostrar como a variação do entreferro ao redor do gerador altera os valores de indução magnética e da tensão induzida em cada barra. Pode-se então verificar o surgimento das correntes de circulação entre os caminhos paralelos

De posse dos estudos elaborados por Rocha [8] sobre as densidades de fluxo dos pólos e a permeância do entreferro de um gerador com sapatas polares com raio único, e com o auxílio da FMRA, definiu-se a distribuição da densidade de fluxo resultante no entreferro.

A divisão do gerador em seis partes ilustrou de forma clara como os diferentes valores de entreferros alteraram os parâmetros de cada parte. Verificou-se na região de menor entreferro, intervalo 1, uma maior densidade de fluxo magnético resultante e no intervalo 3 uma menor densidade.

Desta forma, apoiados no Tensor de Maxwell, as forças no intervalo 1 se mostram superiores às forças no intervalo 3 para a condição do enrolamento original.

A inserção das conexões equipotenciais faz com que se aumente a circulação de corrente entre os caminhos paralelos. Estas correntes têm seu sentido definido em função da tensão em cada ramo.

Onde há um maior entreferro a tensão induzida nas barras e a indução magnética no entreferro são menores; desta forma com a inserção das conexões equipotenciais impõe-se correntes que circulam no intuito de aumentar esta indução resultante. Para tanto é necessário que a indução magnética de reação de armadura se some à indução magnética de excitação dos pólos. Como a tensão nesta região é menor, a corrente passa a circular no sentido contrário, o que provoca a inversão da FMRA, que outrora era contrária à excitação.

Para a região de menor entreferro, haverá maiores tensões induzidas nas barras e indução magnética no entreferro. Assim, as correntes têm por objetivo reduzir os níveis de densidade de fluxo magnético e como as tensões nestas regiões são superiores, as correntes mantêm seu sentido fazendo com que a reação de armadura se mantenha contrária ao campo de excitação dos pólos. Como há um aumento na amplitude das correntes de circulação, há maior reação da armadura, o que faz reduzir a densidade de fluxo resultante no entreferro.

Desta maneira, onde outrora havia altos valores de densidades de fluxo magnético estes são reduzidos e, onde outrora havia menores valores dessas densidades, elas são aumentadas. Com isto há um maior equilíbrio de indução magnética no entreferro e conseqüentemente um maior equilíbrio entre as forças de atração magnética entre os pólos do rotor e o diâmetro interno do estator.

Estando as forças equilibradas, há significativa redução do “Empuxo Magnético” Desbalanceado. Para o caso proposto no P&D Cesp/Alstom há uma redução superior a 40% no UMP com a inserção das conexões equipotenciais.

Esta redução terá impacto nos níveis de oscilação apresentados pelo gerador, esperando que o mesmo passe a operar em maiores faixas, dando maior flexibilidade à inserção de diferentes cargas no mesmo.

Para validação do método outros casos foram apresentados, nos quais se calcula o UMP sem a influência das correntes de circulação e com dois outros tipos de conexão do enrolamento estatórico.

O valor encontrado do UMP sem a reação da armadura mostrou-se acurado quando comparado com valores calculados pela ferramenta da Alstom e por rotina de cálculo baseado nas formulações de Rosenberg [1], o que mostra que as formulação e relações encontradas estão dentro de tolerâncias de engenharia.

Por fim verificou-se quão efetiva é a distribuição dos circuitos paralelos ao redor do estator. Podemos concluir que, para reduzir o “empuxo magnético”, os caminhos paralelos devem ser distribuídos separadamente, evitando assim sobreposições entre caminhos.

## 9 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A metodologia apresentada nesta Dissertação considera o gerador em vazio. Desta forma, como primeira recomendação para trabalhos futuros sugere-se a análise do “Empuxo Magnético” Desbalanceado com o gerador em carga e em rede isolada.

Seguindo a proposta anterior, um segundo estudo seria verificar os campos magnéticos presentes no entreferro e conseqüente UMP em geradores conectados à rede (barramento infinito).

Como terceira recomendação, a análise das correntes de circulação e sua reação de armadura devido ao número de circuitos paralelos no enrolamento do estator é um tema a ser explorado. Sabe-se em meio de projetos de máquinas elétricas girantes que o número de caminhos paralelos influi no UMP. Neste sentido, a obtenção de uma curva que relacione um percentual do “Empuxo Magnético” com o número de caminhos paralelos torna-se aplicável no dia-a-dia do projeto de máquinas.

## **ANEXO A**

**OBTENÇÃO DA FORÇA MAGNETOMOTRIZ DE REAÇÃO DE  
ARMADURA ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

Irá se demonstrar que o campo magnético produzido por um condutor inserido em uma ranhura possui a forma de uma onda dente de serra, conforme definido na seção 2.1.2. Isto será feito com auxílio do método de elementos finitos, utilizando como ferramenta o EFCAD, programa desenvolvido pelo Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos (GRUCAD), da Universidade Federal de Santa Catarina.

Para tanto se utiliza uma estrutura simplificada, com o estator apenas com dois condutores e possuindo passo pleno no enrolamento. Serão apresentadas três simulações: a primeira com corrente em somente um condutor e o outro com corrente nula; a segunda com corrente somente no outro condutor e por fim corrente circulando nos dois condutores.

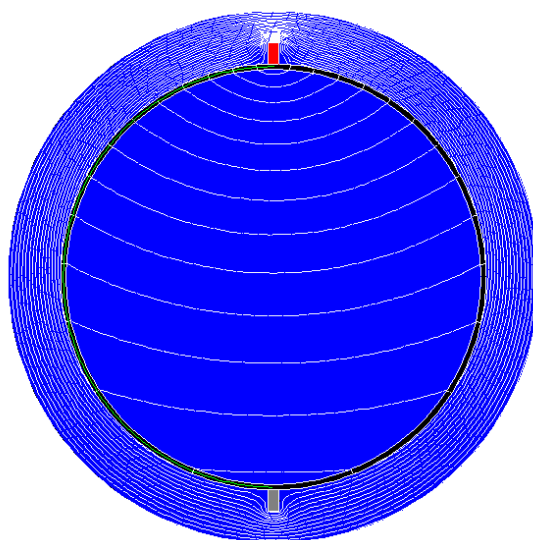


Figura A.1 – Carta de Campo do Condutor 1 Circulando Corrente

A carta de campo da figura A.1 mostra as linhas de fluxo produzidas por um condutor alocado em uma ranhura (condutor na parte superior). O outro condutor não possui corrente.

Traçando-se uma linha no entreferro que englobe o passo do enrolamento, ou seja, de um condutor a outro, obt m-se a indução magnética produzida no entreferro pela circulação de corrente neste condutor.

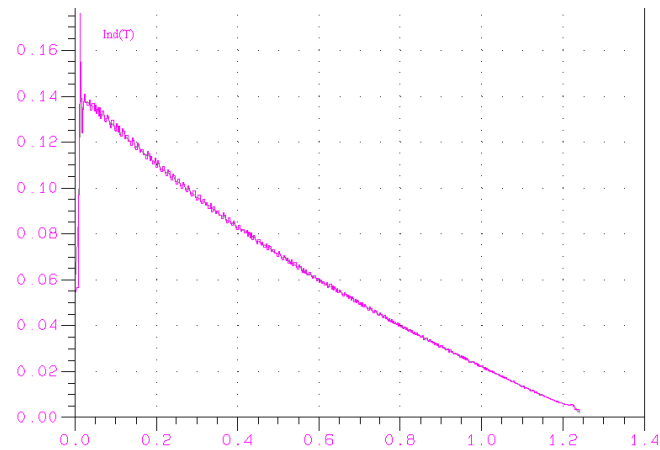


Figura A.2 – Indução Magnética no Entreferro devido Corrente no Condutor 1

A figura A.2 mostra a indução magnética em Tesla, que é o gráfico de saída do programa EFCAD. Como se está interessado na onda da força magnetomotriz, bastaria dividir as magnitudes pela permeabilidade magnética do ar  $\mu_0$ , todavia nosso intuito é mostrar que um condutor inserido em uma ranhura produz no entreferro uma onda dente de serra, e mesmo com esta divisão continuar-se tendo a FMM formando este tipo de onda.

Fazendo-se agora circular corrente no outro condutor (inferior) e zerando a corrente no condutor superior, tem-se a mesma onda com sentido contrário.

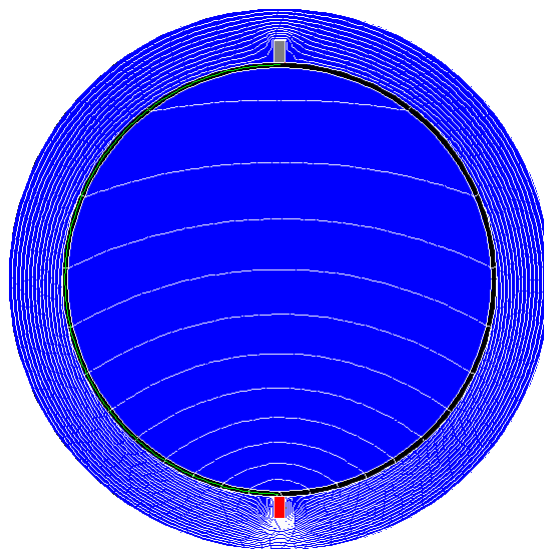


Figura A.3 – Carta de Campo do Condutor 2 Circulando Corrente

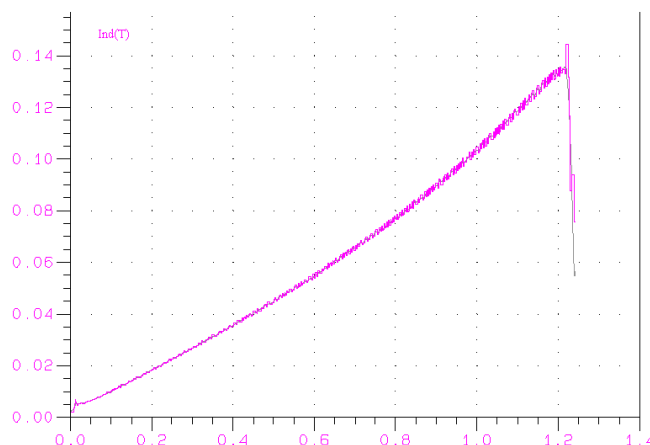


Figura A.4 – Indução Magnética no Entreferro devido Corrente no Condutor 2

A corrente no condutor inferior possui sinal negativo e a corrente no condutor superior sinal positivo. Eles representam uma espira de um enrolamento.

Considerando agora corrente circulando nos dois condutores, temos a carta de campo da figura A.4 e a formação de uma onda próxima de uma onda quadrada, resultado da soma das duas ondas dente de serra, que é por definição a força magnetomotriz de uma espira em um enrolamento.

Quando adicionamos outras espiras, como nos enrolamentos normais, temos a soma dessas várias ondas para a formação da FMM resultante. Este efeito é observado na figura 2.7.

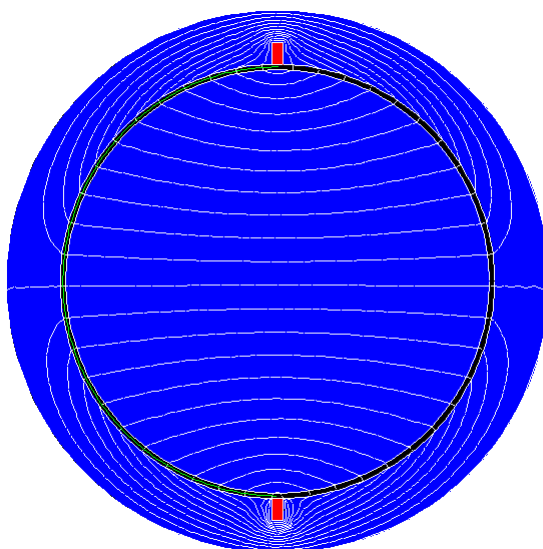


Figura A.5 – Carta de Campo do Condutor 1 e 2 Circulando Corrente



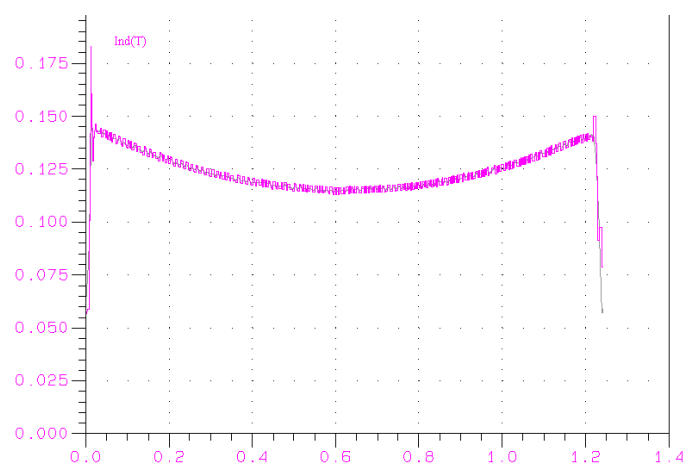


Figura A.6 – Indução Magnética no Entreferro devido Corrente em uma Espira

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ROSEMBERG, E. *Magnetic Pull in Electrical Machines*. Trans. A.I.E.E., 1918, vol.37, pt 2, p. 1425-1469.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Tolerâncias de Montagem de Unidades Hidrelétricas Verticais de Grande Porte*, NBR 13224. Rio de Janeiro, 1994.
- [3] ROBINSON, R.C. *The Calculation of Unbalanced Magnetic Pull in Synchronous and Induction Motors*, Trans. A.I.E.E., vol.62, p. 620-624, 1943.
- [4] BERMAN M.; ERLICK M.S. *Behavior of an Induction Motor with Equalizing Connections in the Stator Winding*. In: ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS IN ISRAEL (5-7 Mar 1991, Israel). *Proceedings*. p. 324-327, Israel, 1991
- [5] BERMAN M. *On the Reduction of Magnetic Pull in Induction Motors with Off-centre Rotor*. In: INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY ANNUAL MEETING (2-8 Oct 1993) p. 343-350 vol.1, 1993.
- [6] DeBORTOLI, M.J.; SALON, S.J.; BUROW, D.W. et al. *Effects of Rotor Eccentricity and Parallel Windings on Induction Machine*. AIEE Transactions on Magnetism, vol.29, n.2, p. 1676-1682, March 1993.
- [7] BURAKOV, A.; ARKKIO, A. *Low-order Parametric Force Model for Eccentric Rotor Electrical Machine with Parallel Connections in Stator Winding*. IEE Proc. Power Appl., vol. 153, n.4, p. 592-600, 2006.
- [8] ROCHA E., J.Johnny. *Uma Análise dos Efeitos do Enrolamento Amortecedor sobre a Força Eletromotriz de Geradores Síncronos de Pólos Salientes*. São Paulo, 1996. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [9] FITZGERALD, A.E. *Máquinas Elétricas*. Tradução Anatólio Laschuk – 6<sup>a</sup> ed. – Porto Alegre: Bookman, 2006.

- [10] HAGUE, B. *The Principles of Electromagnetism Applied to Electrical Machines*. New York, Dover, 1962.
- [11] BASTOS, J.P.A. *Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase-estática*. Florianópolis, Editora da UFSC, 2004.
- [12] KOSTENKO, M.P., PIOTROVSK, L.M.. *Electrical Machines*, vol. I. MIR Publishers, Moscou, 1968.
- [13] BURAKOV, A.; ARKKIO, A. *Mitigation of UMP Components by the Parallel Stator Windings in Eccentric-rotor Electrical Machines*. IEE Proc., p. 1638-1642, 2007.
- [14] Rocha E., J.Johnny. *Una Metodología para la identificación y análisis de fuerzas parasitas de origen electromagnética actuantes em estatores de máquinas síncronas*. X Erlac, Cigré, Puerto Iguazú, Argentina, 2003.